

Universidade de Brasília - UnB  
Campus Darcy Ribeiro  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DOS ATUAIS EQUIPAMENTOS DO  
LABORATÓRIO DE ANTENAS DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA ELÉTRICA E SIMULAÇÃO DE  
ANTENAS VIA *SOFTWARE* 4NEC2**

João Marcos Marra Mendonça

**Brasília, DF  
2015**

Universidade de Brasília - UnB  
Campus Darcy Ribeiro  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DOS ATUAIS EQUIPAMENTOS DO  
LABORATÓRIO DE ANTENAS DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA ELÉTRICA E SIMULAÇÃO DE  
ANTENAS VIA *SOFTWARE* 4NEC2**

João Marcos Marra Mendonça

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia Elétrica da Universidade de  
Brasília, como requisito parcial para obtenção  
do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marco Antonio Brasil Terada

**Banca Examinadora**

---

Marco Antonio Brasil Terada, PhD, Virginia Tech – EUA – Orientador

---

Franklin da Costa Silva, Doutor, UNICAMP – Examinador Interno

---

Paulo Henrique Sales Wanderley – IFB – Examinador Externo

**Brasília, DF  
2015**

*Dedico esse trabalho aos meus pais.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço, antes de tudo, à minha família, que me deu apoio emocional e financeiro durante o curso, em especial aos meus pais. Ao meu orientador, Marco Antonio Brasil Terada, que em todo obstáculo enfrentado durante a realização desse trabalho, me aconselhou e mostrou os caminhos certos a seguir, sempre presente e acessível. Ao Paulo Victor, companheiro de trabalho no Laboratório de Antenas, que esteve comigo durante todo esse período.*

*Agradeço também à Izaura, minha namorada, aos meus amigos que me acompanham desde o ensino médio: Danilo, Igor, Paulo César, Bruno, Ábner e Pedro, e ao meu primo Ricardo, fêis companheiros.*

## RESUMO

O advento das novas tecnologias sem fio, que vem de maneira crescente possibilitando a conexão de dispositivos, com simplicidade e praticidade, sem o incômodo de cabos e conexões, torna-se um motivador para o interesse no estudo de sistemas e métodos de transmissão de dados via radiofrequência.

Com isso, com esse trabalho, tive como objetivo principal ter contato com o Laboratório de Antenas de Engenharia Elétrica – UnB, realizando uma inspeção minuciosa sobre os atuais equipamentos e fazendo uma análise para os semestres posteriores, como por exemplo equipamentos necessários para a realização de um curso de Antenas, não apenas com parte teórica, mas também com laboratório, como existia antigamente no curso de Engenharia Elétrica, sendo um dos motivos para a interrupção dessa disciplina, a situação em que se encontra o Laboratório de Antenas. Além disso, foram realizadas diversas simulações computacionais via *software* 4nec2, tendo como base as características das antenas encontradas nesse laboratório.

---

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS .....	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 A TEORIA ELETROMAGNÉTICA .....	3
2.2 LEI DE GAUSS ELÉTRICA .....	4
2.3 LEI DE GAUSS PARA O MAGNETISMO .....	5
2.4 LEI DE FARADAY .....	5
2.5 LEI DE AMPÈRE-MAXWELL .....	6
2.5.1 LEI CIRCUITAL DE AMPÈRE .....	6
2.5.2 CORRENTE DE DESLOCAMENTO DE MAXWELL .....	7
<b>3 PARÂMETROS E PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS DE UMA ANTENA.....</b>	<b>8</b>
3.1 POLARIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO .....	9
3.2 DIAGRAMAS DE RADIAÇÃO .....	11
3.3 LARGURA DE FEIXE E LÓBULOS PRINCIPAIS E SECUNDÁRIOS .....	13
3.4 DIRETIVIDADE E GANHO .....	14
3.5 IMPEDÂNCIA DE ENTRADA .....	15
3.6 PARÂMETRO DE ESPALHAMENTO (PARÂMETROS S) .....	19
3.7 LARGURA DE BANDA .....	20
<b>4 ANÁLISE DO LABORATÓRIO DE ANTENAS DO ENE/U<sub>n</sub>B.....</b>	<b>21</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO .....	21
4.2 UNIDADE DE CONTROLE REMOTO .....	22
4.3 POSICIONADOR (AZIMUTE E ELEVAÇÃO) .....	22
4.4 SELETOR DE SINCRONISMO (MODELO 1588) .....	24
4.5 TRANSMISSOR .....	24
4.6 RECEPTOR DE MICROONDAS .....	25
4.7 BOLÔMETRO A CRISTAL .....	25
4.8 PLOTTER .....	26
4.9 ANTENAS .....	26
4.10 CABOS .....	26
4.11 AGILENT <i>FIELDFOX</i> (N9912A) - ANALISADOR RF .....	28
<b>5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....</b>	<b>29</b>
5.1 ANTENA DIPOLO .....	29
5.2 ANTENA LOG-PERÍODICA .....	31
5.3 ANTENA YAGI .....	34
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>38</b>
 <b>APÊNDICE - PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS DE SWR E DIAGRAMA DE RADIAÇÃO NO LABORATÓRIO DE ANTENAS</b>	
1 MEDIDA DE SWR.....	39
2 MEDIDA DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO.....	39

## Lista de Tabelas

4.2	TABELA 1 – DESCRIÇÃO DOS CONTROLES DA UNIDADE DE CONTROLE REMOTO .....	22
4.5	TABELA 2 – DESCRIÇÃO DOS CONTROLES DO TRANSMISSOR .....	24
4.5	TABELA 3 – FUNÇÃO DOS CONECTORES .....	24
4.10	TABELA 4 – PERDA DOS CABOS RG213U E RG214U .....	27
4.10	TABELA 5 – PERDA DOS CABOS LDF4 – 50A .....	27

## Lista de Figuras

2.1	DENSIDADE DE FLUXO ELÉTRICO $D_s$ EM P DEVIDO À CARGA Q.....	4
2.2	UM CONDUTOR TEM UMA CORRENTE TOTAL I. ....	7
3.1	TIPOS DE POLARIZAÇÃO.....	9
3.2	PLANO UV MOSTRADO NA FIGURA 3.1 .....	10
3.3	COMPONENTES DE CAMPO ELÉTRICO DISTANTE.....	10
3.4	COORDENADAS ESFÉRICAS .....	12
3.5	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO POLAR DE UM DIPOLO (EM Y).....	12
3.6	DIAGRAMA RETANGULAR DE UM DIPOLO .....	13
3.7	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO RETANGULAR .....	13
3.8	APROXIMAÇÃO DA DIRETIVIDADE D .....	15
3.9	UM EXEMPLO DE LINHA DE TRANSMISSÃO .....	16
3.10	CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LINHA DE TRANSMISSÃO .....	16
3.11	ONDA INCIDENTE E ONDA REFLETIDA .....	17
3.12	ANTENA DIPOLO ALIMENTADA POR UMA LINHA DE TRANSMISSÃO DE IMPEDÂNCIA CARACTERÍSTICA $Z_0$ .....	18
3.13	ESQUEMÁTICO DE UM QUADRIPOLO .....	19
3.14	REPRESENTAÇÃO DO PARÂMETRO S .....	19
4.1	UNIDADE DE CONTROLE REMOTO COM OS CURSORES DE AZIMUTE, ELEVAÇÃO E POLARIZAÇÃO .....	22
4.2	CONECTORES RESPONSÁVEIS PELOS COMANDOS DO POSICIONADOR .....	23
4.3	PAINEL TRASEIRO DO TRANSMISSOR .....	25
4.4	RECEPTOR DE MICROONDAS .....	25
4.5	AGILENT <i>FIELDFOX</i> PORTÁTIL.....	28
5.1	ANTENA DIPOLO DO LABORATÓRIO DE ANTENAS – FREQUÊNCIA 350 A 590MHZ.....	29
5.2	PARÂMETROS DA ANTENA DIPOLO – 115MHZ .....	30
5.3	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DE UMA ANTENA DIPOLO .....	30
5.4	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO VERTICAL DE UMA ANTENA DIPOLO .....	31
5.5	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE UMA ANTENA DIPOLO.....	31
5.6	ANTENA LOG-PERÍODICA .....	32
5.7	PARÂMETROS DA ANTENA LOG-PERÍODICA – 100MHZ .....	33
5.8	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DE UMA ANTENA LOG-PERÍODICA .....	33
5.9	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO VERTICAL DE UMA ANTENA LOG-PERÍODICA .....	34
5.10	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE UMA ANTENA LOG-PERÍODICA .....	34
5.11	PARÂMETROS DA ANTENA YAGI – 220MHZ.....	35
5.12	GEOMETRIA DE UMA ANTENA YAGI – 16 ELEMENTOS.....	35
5.13	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO HORIZONTAL DE UMA ANTENA YAGI.....	36
5.14	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO VERTICAL DE UMA ANTENA YAGI.....	36
5.15	DIAGRAMA DE RADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE UMA ANTENA YAGI.....	37



## Lista de Símbolos

<b>E</b>	Vetor campo Elétrico
<b>B</b>	Vetor campo Magnético
<b>R</b>	Valor de resistência
<b>L</b>	Valor de indutância
<b>C</b>	Valor de capacitância
<b>G</b>	Ganho de potência
<b>EIRP</b> Power)	Potência Isotrópica Irradiada Equivalente (Equivalent isotropically radiated Power)
<b>U</b>	Intensidade de radiação
<b><math>\eta</math></b>	Rendimento
<b><math>\lambda</math></b>	Comprimento de Onda
<b><math>\lambda_g</math></b>	Comprimento de Onda Guiado
<b><math>\Gamma</math></b>	Coefficiente de Reflexão



## **1. Introdução**

As antenas constituem a parte essencial de todo sistema de comunicação uma vez que são responsáveis por receber e transmitir ondas eletromagnéticas. Além disso, servem para otimizar ou acentuar a radiação de energia nas direções de interesse. Por esta razão, elas adquirem diferentes formas: lineares, de abertura, impressas, refletoras, dentre outras.

A utilização de antenas, para transmissão de sinais de rádio, foi iniciada por Heinrich Hertz, no final do século dezanove, quando ele procurava provar a existência das ondas eletromagnéticas previstas teoricamente por Maxwell. No âmbito de sua experiência, Hertz provou que uma antena emite energia eletromagnética para o espaço sempre que excitada por uma corrente elétrica variável no tempo. A circulação desta corrente na antena produz campos que escapam do condutor, propagando a onda eletromagnética.

Desde as primeiras antenas até os modelos atuais, diversas inovações tecnológicas foram agregadas a este dispositivo a fim de garantir segurança e integridade da informação. Dentre os diversos tipos de antenas desenvolvidas, as antenas lineares são as mais simples e as mais utilizadas, o que justifica o grande interesse científico e tecnológico neste campo.

Com o expressivo avanço das telecomunicações, o conhecimento em antenas, torna-se imprescindível para pesquisadores e profissionais da área. Os sistemas de telecomunicações, normalmente, utilizam uma associação de duas ou mais antenas, colocadas próximas entre si, para obter maior diretividade e/ou cobertura específica. Essa associação recebe o nome de conjunto de antenas, redes de antenas ou ainda, sistemas de antenas.[2]

### **1.1 - Objetivos**

Como objetivo desse trabalho, pretende-se realizar simulações com as Antenas que o Laboratório de Antenas do ENE/UnB possui, podendo ser observado na prática itens que serão descritos no tópico 3 desse trabalho. Além disso, será relatado o sistema de transmissão e recepção presente no Laboratório, assim como os equipamentos que integram esse sistema, analisando a funcionalidade destes, os defeitos encontrados que inviabilizaram o andamento correto para conclusão do objetivo inicial desse trabalho e as alternativas encontradas para os obstáculos enfrentados durante a realização deste.

### **1.2 – Organização do Trabalho**

O trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica sobre a Teoria Eletromagnética, de suma importância para a compreensão dos capítulos posteriores.

No capítulo 3 serão apresentados os parâmetros e propriedades fundamentais de uma antena, necessário para uma correta compreensão das simulações que serão realizadas no *software* 4NEC2.

No capítulo 4 será feita uma análise dos equipamentos e sistemas disponíveis no Laboratório de Antenas do ENE/UnB, utilizados para realização de experimentos.

No capítulo 5 serão mostradas as simulações computacionais de antenas disponíveis no laboratório, mostrando alguns dos parâmetros fundamentais de uma antena, descritos no tópico 3.

Por fim, o capítulo 6 descreve a conclusão a que se chegou com esse trabalho.

## 2 – Revisão Bibliográfica

### 2.1 – A Teoria Eletromagnética

O eletromagnetismo moderno é baseado em um conjunto de quatro relações fundamentais conhecidas como equações de Maxwell, nas formas integral e diferencial, são dadas por

1. Lei de Gauss Elétrica:

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q}{\epsilon_0}, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

2. Lei de Gauss Magnética:

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

3. Lei de Faraday:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}, \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (3)$$

4. Lei de Ampère-Maxwell :

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (4)$$

onde  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{D}$  são grandezas de campo elétrico inter-relacionadas por  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ , sendo  $\epsilon$  a permissividade elétrica do material;  $\mathbf{B}$  e  $\mathbf{H}$  são grandezas do campo magnético inter-relacionadas por  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ , sendo  $\mu$  a permeabilidade magnética do material;  $\rho v$  é a densidade de carga elétrica por unidade de volume; e  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente por unidade de área.

Essas equações se aplicam a qualquer material, incluindo o espaço livre (vácuo), e em qualquer localização no espaço (x, y e z). Em geral, todas as grandezas nas equações de Maxwell podem ser uma função do tempo t. [4]

Pela formulação dessas equações, publicadas num tratado clássico em 1873, James Clerk Maxwell estabeleceu a primeira teoria unificada da eletricidade e do magnetismo. Suas equações, deduzidas a partir de observações experimentais descritas por Gauss, Ampère e Faraday, entre outros, não apenas englobaram as relações entre campo elétrico e carga elétrica e entre campo magnético e corrente elétrica, como também definiram a relação bilateral entre as grandezas de campos elétricos e magnéticos.[8]

Juntamente com algumas relações auxiliares, as equações de Maxwell formam o princípio fundamental da teoria do eletromagnetismo. Dito isso, esse capítulo será subdividido para uma análise resumida da teoria eletromagnética, abordando as equações de Maxwell e suas aplicações, sendo de suma importância para o prosseguimento deste trabalho, por ter como foco principal o Laboratório de Antenas.

## 2.2 – Lei de Gauss elétrica

Por volta de 1837, o diretor da *Royal Society* de Londres, Michael Faraday descobriu que a carga total na esfera externa era igual em magnitude à carga original com que a esfera interna era carregada e que isto era verdade independente do material dielétrico que separava as duas esferas. Ele concluiu, portanto, que da esfera interna para a externa havia um certo tipo de “deslocamento” que era independente do meio, ou seja, um fluxo elétrico.[1]

Os resultados desses experimentos de Faraday podem ser resumidos em uma lei experimental que estabelece que o fluxo elétrico que passa através de uma superfície esférica imaginária situada entre duas esferas condutoras é igual à carga contida dentro da superfície imaginária. Essa carga contida está distribuída pela superfície da esfera interna ou pode estar concentrada em uma carga pontual no centro da esfera imaginária. Contudo, como um coulomb de fluxo elétrico é produzido por um coulomb de carga, o condutor interno pode ser tanto um cubo quanto uma chave de metal que a carga total induzida na esfera externa ainda será a mesma.

Tendo isso em mãos, a contribuição de Gauss, a partir de generalizações dos experimentos de Faraday levaram à seguinte afirmativa, conhecida como a lei de Gauss: o fluxo elétrico atravessando qualquer superfície fechada é igual à carga total contida nesta superfície.[6]

Uma distribuição de carga, como mostrada na figura 2.1, envolvidas por uma superfície fechada com uma forma qualquer. A superfície fechada pode ser uma superfície de algum material real, porém, de maneira mais geral, é qualquer superfície fechada que quisermos visualizar. Se a carga total é  $Q$ , então  $Q$  coulombs de fluxo elétrico irão atravessar a superfície circundante. Em cada ponto da superfície, o vetor densidade de fluxo elétrico  $\mathbf{D}$  terá algum valor  $\mathbf{D}_S$ , onde o índice  $S$  meramente nos lembra que  $\mathbf{D}$  deve ser calculado na superfície, e  $\mathbf{D}_S$  irá em geral variar em magnitude e direção de um ponto da superfície para outro.

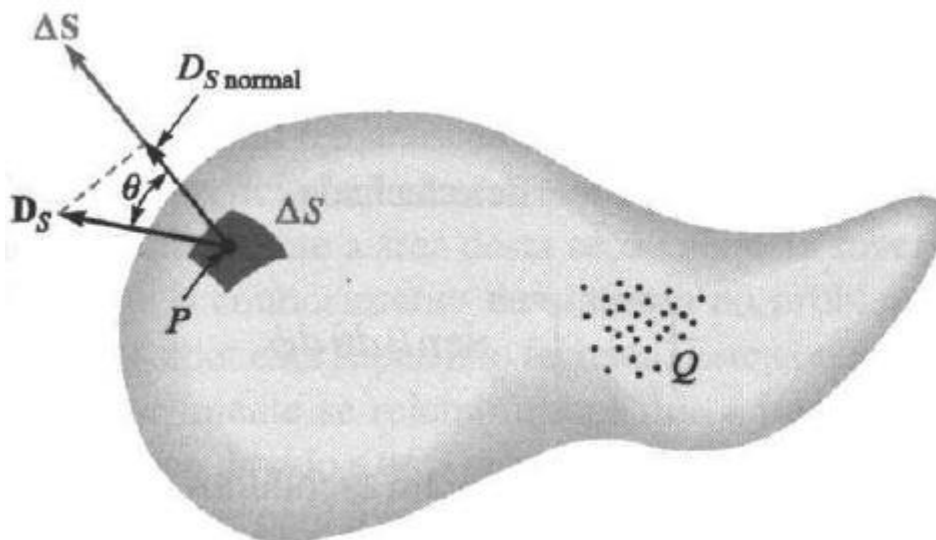


Figura 2.1: Densidade de fluxo elétrico  $\mathbf{D}_S$  em  $P$  devido à carga  $Q$ .

A afirmativa matemática que expressa o entendimento de Gauss acerca disso pode ser descrita em termos da distribuição de carga como

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{vol} \rho_v dv \quad (5)$$

uma afirmativa matemática significando simplesmente que o fluxo elétrico total através de qualquer superfície fechada é igual à carga envolvida. [2]

### 2.3 – Lei de Gauss para o Magnetismo

O fluxo líquido de saída da densidade de fluxo  $\mathbf{D}$  através de uma superfície fechada que envolve uma carga  $Q$  é igual a  $Q$ , propriedade da lei de Gauss (para eletricidade) e expressamos essa lei matematicamente nas formas diferencial e integral como mostrado em (6). O análogo magnético de uma carga pontual é um polo magnético, porém, ao passo que as cargas elétricas podem existir isoladamente, o mesmo não acontece com os polos magnéticos. [4]

Os polos magnéticos sempre ocorrem aos pares; não importando em quantas partes um ímã permanente é dividido, cada nova parte sempre terá um polo norte e um polo sul, mesmo se esse processo de divisão continuar até o nível atômico. Portanto, não existe equivalência magnética com uma carga  $Q$  ou uma densidade de carga  $\rho_v$ , sendo a lei de Gauss para o magnetismo:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \leftrightarrow \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = Qm \quad (6)$$

A forma diferencial é uma das quatro equações de Maxwell, e a forma integral é obtida com o auxílio do teorema da divergência. Formalmente, o nome “Lei de Gauss” se refere ao caso elétrico, mesmo quando nenhuma referência específica à eletricidade é feita.

A propriedade descrita em (6) é denominada “lei da não-existência de polos isolados”, “lei da conservação do fluxo magnético” e “lei de Gauss para o magnetismo”, dentre outras.

A diferença entre a lei de Gauss para a eletricidade e a equivalente para o magnetismo pode ser vista em termos de linhas de campo. As linhas de campo elétrico se originam na carga elétrica positiva e terminam na carga elétrica negativa. Portanto, o fluxo elétrico através de uma superfície fechada que envolve uma das cargas não é zero. Em contrapartida, as linhas de campo magnético formam loops fechados contínuos. Devido às linhas de campo magnético formarem *loops* fechados, o fluxo magnético líquido através de uma superfície fechada em torno do polo sul do ímã (ou através de qualquer outra superfície) é sempre zero, independentemente da forma da superfície.[3]

### 2.4 – Lei de Faraday

A estreita relação entre eletricidade e magnetismo foi estabelecida por Oersted, que demonstrou que um fio conduzindo uma corrente elétrica exerce uma força sobre a agulha de uma bússola e que a agulha sempre gira de forma a apontar na direção  $\hat{\phi}$  quando a corrente está ao longo da direção  $\hat{z}$ . A força que atua na agulha da bússola é decorrente do campo magnético produzido pela corrente no fio.[5]

Pesquisando essa descoberta, Michael Faraday desenvolveu as seguintes hipóteses: se uma corrente pode produzir um campo magnético, então o inverso também pode ser verdadeiro: um campo magnético deve produzir uma corrente num fio. Após realizar uma série de experimentos, Faraday descobriu que campos magnéticos podem produzir corrente elétrica em um *loop* fechado, porém apenas se o fluxo magnético enlaçado na superfície do *loop* for variante no tempo.

A força eletromotriz (fem) induzida em um *loop* condutor fechado de N espiras é dada por:

$$V_{fem} = -N \frac{d\Phi}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (7)$$

conhecida como lei de Faraday, em sua forma integral.

Nota-se que a derivada da Eq. (6) é uma derivada total que opera no campo magnético  $\mathbf{B}$ , bem como na superfície diferencial  $ds$ . Conseqüentemente, uma fem pode ser gerada num *loop* condutor fechado sob quaisquer das três condições a seguir:

- Um campo magnético variante no tempo enlaçado num *loop* estacionário; a fem induzida é então denominada força eletromotriz de transformação.
- Um *loop* em movimento com uma área variante no tempo (em relação à componente normal de  $\mathbf{B}$ ) em um campo  $\mathbf{B}$  estático; a fem induzida é então denominada força eletromotriz de movimento.
- Um *loop* em movimento em um campo  $\mathbf{B}$  variante no tempo.

Para  $N = 1$  (ou seja, *loop* com uma espira), podemos igualar as equações a seguir

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (8)$$

a qual é a forma integral da lei de Faraday. Aplicando o teorema de Stokes no lado esquerdo da Eq. (7), temos

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot d\mathbf{s} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (9)$$

e para que duas integrais sejam iguais, seus integrandos têm de ser iguais, o que resulta em

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (10)$$

sendo, portanto, a forma diferencial da lei de Faraday. Essa forma diferencial diz que um campo magnético variante no tempo induz um campo elétrico  $\mathbf{E}$  cujo rotacional é igual ao negativo da derivada no tempo de  $\mathbf{B}$ . Ainda que a dedução conduza à lei de Faraday que começou considerando o campo associado a um circuito físico, a Eq. (9) se aplica a qualquer ponto do espaço, existindo ou não um circuito físico no ponto. [3]

## 2.5 – Lei de Ampère-Maxwell

### 2.5.1 – Lei Circuital de Ampère

A lei circuital de Ampère afirma que a integral de linha de  $\mathbf{H}$  em qualquer caminho fechado é exatamente igual à corrente contínua envolvida pelo caminho.



$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = I \quad (11)$$

Definimos corrente positiva como aquela que flui na direção de avanço de um parafuso direito girado na direção em que o caminho fechado é percorrido.[8]

De acordo com a Fig 2.2, que mostra um fio circular conduzindo uma corrente contínua  $I$ , a integral de linha de  $\mathbf{H}$  nos caminhos fechados indicados por  $a$  e  $b$  resultam em uma resposta  $I$ ; a integral no caminho fechado  $c$ , o qual passa através do condutor, fornece uma resposta menor que  $I$  e é exatamente aquela porção da corrente total que é envolvida pelo caminho  $c$ . Embora os caminhos  $a$  e  $b$  forneçam a mesma resposta, os integrandos são, é claro, diferentes. A integral de linha nos leva a multiplicar a componente de  $\mathbf{H}$  na direção do caminho por um pequeno comprimento incremental do caminho em um ponto do mesmo, mover ao longo do caminho até o próximo comprimento incremental e repetir o processo, continuando até que o caminho seja completamente percorrido. Como  $\mathbf{H}$  irá geralmente variar de ponto para ponto e como os caminhos  $a$  e  $b$  não são iguais, as contribuições para a integral feitas por cada micrômetro do caminho são inteiramente diferentes. Apenas as respostas finais são as mesmas. [2]

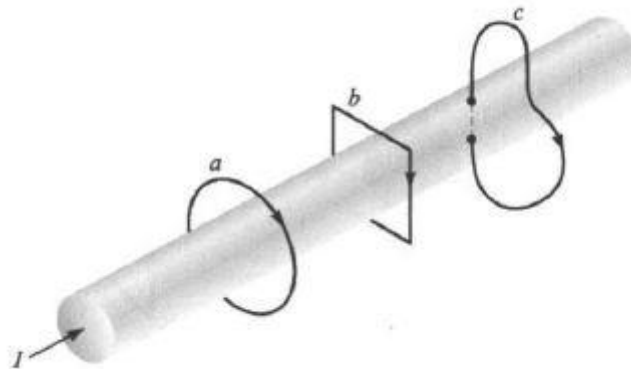


Figura 2.2: Um condutor tem uma corrente total  $I$ . A integral de linha de  $\mathbf{H}$  em torno dos caminhos fechados  $a$  e  $b$  é igual a  $I$  e a integral em torno do caminho  $c$  é menor do que  $I$ , já que toda a corrente não é envolvida pelo caminho

### 2.5.2 – Corrente de deslocamento de Maxwell

Em princípio, o cálculo do campo magnético de uma distribuição de corrente é dado pela lei de Ampère, a qual relaciona a integral de linha de um campo magnético em caminho fechado com a corrente interceptada por uma superfície delimitada pelo contorno do *loop* escolhido. [5]

Tendo como base a figura 2.3, um capacitor de placas paralelas sendo carregado por uma bateria, num certo instante de tempo (da ordem da constante de tempo do circuito) a corrente que alimenta as placas do capacitor é  $I$ . Aplicando a lei circuital de Ampère, Maxwell percebeu que essa lei viola o princípio de conservação de carga quando aplicada a correntes elétricas não-estacionárias.

No exemplo do capacitor de placas paralelas, se estas tiverem área  $A$  e a distância entre elas for suficientemente pequena para que as placas sejam tratadas como sendo infinitamente expressas, a lei de Gauss nos fornece o campo elétrico entre as placas:

$$E(t) = \frac{q(t)}{\varepsilon_0 A}, \quad (12)$$

onde  $I = dq/dt$  é a taxa com que a carga nas placas do capacitor está aumentando ou diminuindo. A taxa de variação temporal do campo elétrico entre as placas será, então:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\varepsilon_0 A} \frac{dq}{dt} = \frac{I}{\varepsilon_0 A}. \quad (13)$$

Supondo que haja conservação de carga em todo o circuito, a corrente de deslocamento  $I_d$  deve ser igual à corrente de condução  $I$  fora das placas, ou seja, em geral, define-se uma densidade de corrente de deslocamento como sendo:

$$\mathbf{J}_d = \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (14)$$

Maxwell, no contexto da sua teoria do campo eletromagnético, associou o campo elétrico ao deslocamento sem atrito de rolamentos entre os vórtices do éter.[3] Por esse motivo, por razões históricas, esse termo até hoje é conhecido como densidade de corrente de deslocamento, ainda que não envolva deslocamento algum de cargas, tendo proposto, então, que a lei circuital de Ampère fosse modificada na presença de correntes não-estacionárias, pela inclusão da densidade de corrente de deslocamento à densidade de corrente de condução  $\mathbf{J}$  em (13):

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{J} + \mathbf{J}_d) \quad (15)$$

que substituindo, temos:

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{J}, \quad (16)$$

que é a lei de Àmpere-Maxwell.

Integrando (15) numa superfície aberta e fixa  $S$  e aplicando o teorema de *Stokes* à primeira integral obtemos a forma integral da Lei de Ampère-Maxwell:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}. \quad (17)$$

### 3 – Parâmetros e Propriedades Fundamentais de uma Antena

A irradiação, ou a emissão de ondas eletromagnéticas no espaço, é obtida, de forma eficiente, com a ajuda de estrutura condutoras ou dielétricas chamadas de antenas. Teoricamente, qualquer estrutura pode irradiar ondas eletromagnéticas, mas nem todas o farão de forma eficiente.

Uma antena pode também ser vista como um transdutor usado para casar a linha de transmissão ou guia de onda (usados no guiamento da onda a ser emitida) ao meio circundante, ou vice-versa. A antena é necessária por duas razões principais: melhorar a eficiência de irradiação e o casamento de impedâncias, visando minimizar reflexões. A antena usa, ou a corrente e a tensão de uma linha de transmissão, ou campo eletromagnéticos de um guia de onda para emitir uma onda no meio. [1]

Para descrever quantitativamente a performance de uma antena, é necessário definir os parâmetros e propriedades fundamentais da mesma[2]. Alguns dos parâmetros e propriedades são inter-relacionados, de modo que nem todos necessitam ser especificados para a caracterizar completamente a performance operacional da antena, dessa forma, esse capítulo definirá:

1. Polarização do Campo Eletromagnético
2. Diagrama de Radiação
3. Largura de feixe e lóbulos laterais
4. Diretividade e Ganho
5. Impedância de Entrada
6. Parâmetro de Espalhamento
7. Largura de Banda

### 3.1 – Polarização do Campo Eletromagnético

Em termos simples, a polarização de uma antena define a direção do vetor  $\vec{E}$  por ela irradiado com relação a um plano de referência. Em uma onda eletromagnética, as distribuições dos campos elétricos e magnéticos variam ao longo do tempo. O campo elétrico total da onda irradiada é composto por componentes ortogonais, que diferem em amplitude e fase. A orientação do vetor campo elétrico determina a polarização, que pode ser: linear, circular ou elíptica.

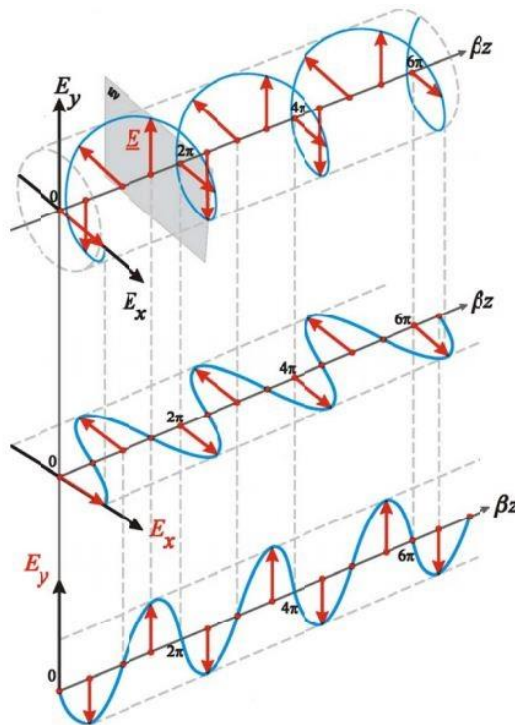


Figura 3.1 – Tipos de Polarização

Na figura 3.1, é mostrado, respectivamente, uma onda eletromagnética com polarização elíptica, linear horizontal e linear vertical. No primeiro caso, a onda propaga-se na direção  $z$  e o vetor  $\vec{E}$ , em vermelho, descreve uma hélice de seção transversal elíptica, em azul. No plano  $uv$ , localizado em uma determinada posição do eixo  $z$  e perpendicular ao mesmo, o vetor  $\vec{E}$  descreve uma elipse (figura 3.2) à medida que  $uv$  é deslocado ao longo de  $z$ . Quando a seção transversal da hélice descrita por  $\vec{E}$  é um círculo, a polarização é denominada Polarização Circular. No segundo e terceiro caso, ambos são casos particulares da onda eletromagnética com polarização elíptica.

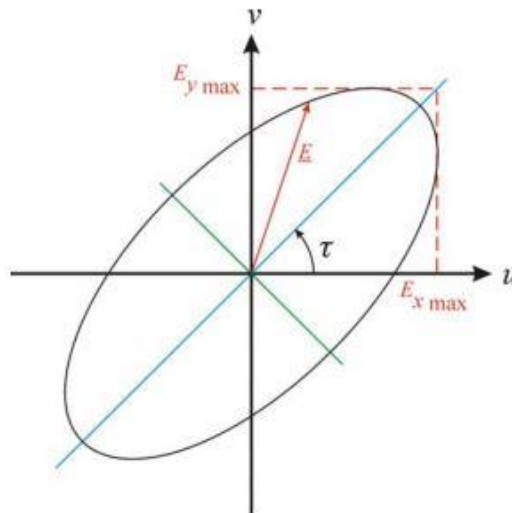
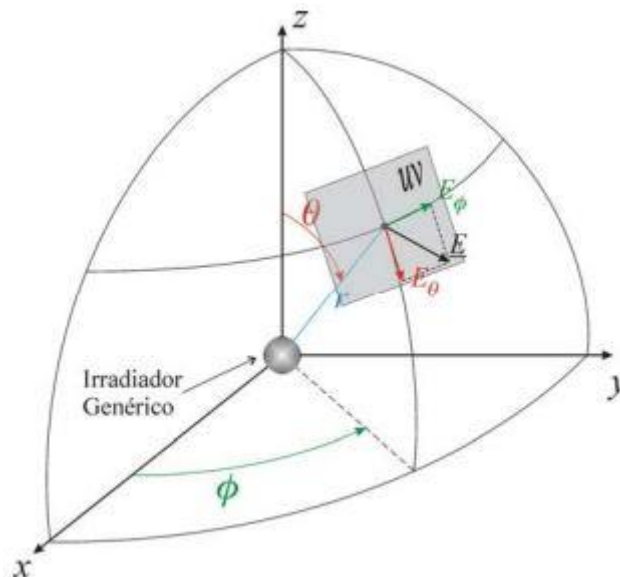


Figura 3.2 – Plano  $uv$  mostrado na figura 3.1

Para um irradiador genérico referenciado a um sistema de coordenadas esféricas ( $r$ ,  $\theta$  e  $\phi$ ), o plano  $uv$  de giro do vetor  $\vec{E}$  é tangente à superfície esférica de raio  $r$  sobre a qual encontra-se o ponto onde deseja-se determinar  $\vec{E}$ :



### Figura 3.3 – Componentes de Campo Elétrico Distante

Utilizando a geometria e notação da figura 3.3, o  $E_{\phi\max}$  vetor campo elétrico é dado por:

$$\vec{E} = \overline{E_{\theta}}E_{\theta\max} \cos(\omega t) + \overline{E_{\phi}}E_{\phi\max} \cos(\omega t) \quad (18)$$

sendo  $E_{\theta}$  e  $E_{\phi}$  as amplitudes, definidas ao longo dos eixos cartesianos dos vetores unitários  $\theta$  e  $\phi$ , e  $\alpha$  a defasagem no tempo entre estas componentes. A equação 18 pode ser escrita assumindo:

$$u = E_{\theta\max} \cos(\omega t) \quad (19)$$

$$v = E_{\phi\max} \cos(\omega t + \alpha) \quad (20)$$

A polarização linear e circular, como dito anteriormente, são casos especiais da polarização elíptica. Quando as duas componentes do campo elétrico radiado estão oscilando em fase o tempo, ou seja,  $\alpha = 0$ , ou em oposição de fase,  $\alpha = \pi$ , a polarização é linear. Caso as duas componentes ortogonais tenham a mesma amplitude e estão defasadas de  $90^\circ$ , isto é, oscilam em quadratura de fase no tempo,  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , a situação é de polarização circular. Para todos os outros casos, a polarização é elíptica.

Para o caso da Polarização Linear, é comum associar-se a orientação da antena em relação ao solo. Assim, por exemplo, um monopólio aterrado para radiodifusão apresenta Polarização Vertical porque o campo elétrico  $\vec{E}$  varia na direção vertical.

É imperativo que a polarização da antena transmissora (TX) seja compatível com a polarização da antena receptora (RX), caso contrário, a antena RX captará pouco ou nenhum sinal da antena TX, mesmo quando relativamente próximas uma da outra. Esta seletividade resultante da polarização entre antena transmissora e receptora é frequentemente utilizada para evitar interferências entre sinais TX-RX próximos que operem na mesma frequência.

### 3.2 – Diagrama de Radiação

Conhecer o padrão de radiação de uma antena, ou ainda controlar este comportamento pode ser de extrema importância para um determinado projeto, a distribuição da energia eletromagnética de maneira ineficaz pode afetar o funcionamento ou rendimento de determinados sistemas. As definições e imagens relatadas neste item foram extraídas das referências bibliográficas [3], [4] e [5].

O diagrama de radiação representa graficamente o comportamento da antena quanto a sua irradiação.[12] Apesar da irradiação ser tridimensional, o diagrama é comumente encontrado nos planos horizontal e vertical.

Uma estrutura irradiante apresenta direções segundo as quais para uma mesma potência total irradiada é possível registrar diferentes intensidades de campo elétrico a uma distância  $r$ . Com o aumento da distância, a intensidade de campo elétrico diminui.

$$\mathbf{E} = \frac{E_0}{r} f(\theta, \varphi) \quad (21)$$

Para uma mesma esfera  $r$  ao redor de uma fonte isotrópica, a função  $f(\theta, \varphi)$  é responsável pela “forma” da distribuição do campo sobre esta esfera, chamando-se esta função

de “diagrama de irradiação” ou “diagrama de um campo distante”[10]. Variando o raio  $r$ , pode-se notar que o campo elétrico terá sempre a mesma forma, isto é, ao tomar  $r$  que satisfaça à condição de zona de irradiação, os diagramas independem da distância a fonte, sempre tendo a mesma forma.

Se as antenas têm polarização linear, também se pode escolher o par de seções paralelas aos vetores campos elétrico e magnético, denominados planos **E** e plano **H**. A representação gráfica do diagrama de radiação pode variar dependendo da capacidade da antenna em concentrar a energia eletromagnética em determinada região do espaço. Para uma antenna dipolo, por exemplo, que tem como característica o espalhamento esférico (em algumas direções), comumente utiliza-se a seção principal das coordenadas esféricas, conforme figura 3.4.

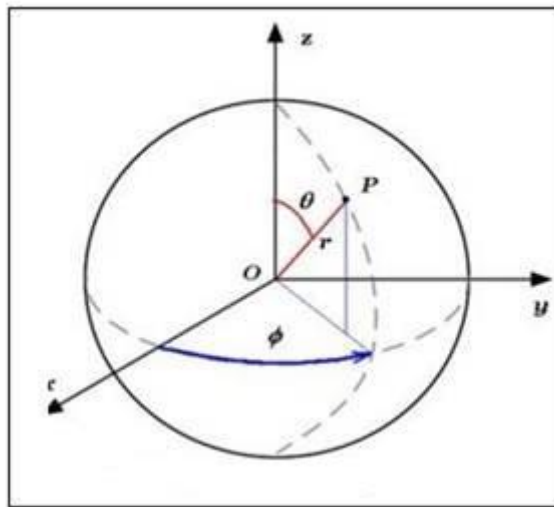


Figura 3.4: Coordenadas esféricas

Já para antenas direcionais é comum utilizar pares de seções perpendiculares, que passam pela direção de radiação máxima, onde uma das seções escolhidas é o plano em que o lóbulo principal do diagrama tem largura mínima. Para antenas com polarização linear também se pode escolher o par de seções paralelas aos vetores de campo elétrico e campo magnético, utilizando coordenadas polares e cartesianas em diferentes escalas de amplitude, sendo estas escalas lineares para campo e quadrática para potência ou logaritmo (dB). Nas figuras 3.5 e 3.6 pode-se observar o mesmo diagrama de radiação sendo representado na forma polar e retangular, respectivamente.

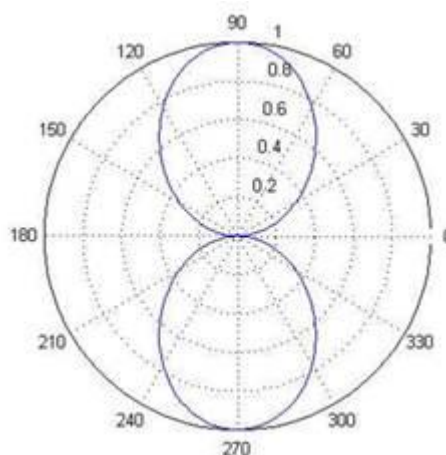


Figura 3.5: Diagrama de radiação polar de um dipolo (em Y)

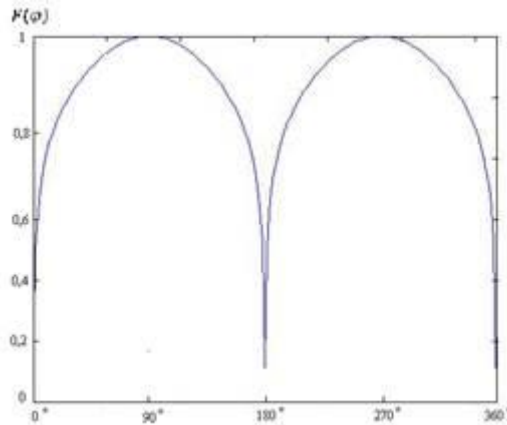


Figura 3.6: Diagrama retangular de um dipolo

Para esse trabalho foram realizadas simulações dos diagramas de irradiação das antenas presentes no Laboratório de Antenas, que serão demonstradas em tópicos seguintes, isso se deve ao fato de que, com o diagrama de radiação em mãos, com uma rápida análise é possível escolher a antena que melhor atende às necessidades do sistema.

### 3.3 – Largura de Feixe e Lóbulos Principais e Secundários

Em um diagrama de radiação é possível identificar a presença de uma região de maiores intensidades, essa região é chamada de “lóculo principal”, em consequência as demais regiões onde ocorrem picos de intensidade menores são chamadas de “lóbulos secundários” ou “laterais”, conforme mostra a figura 3.7. [2]

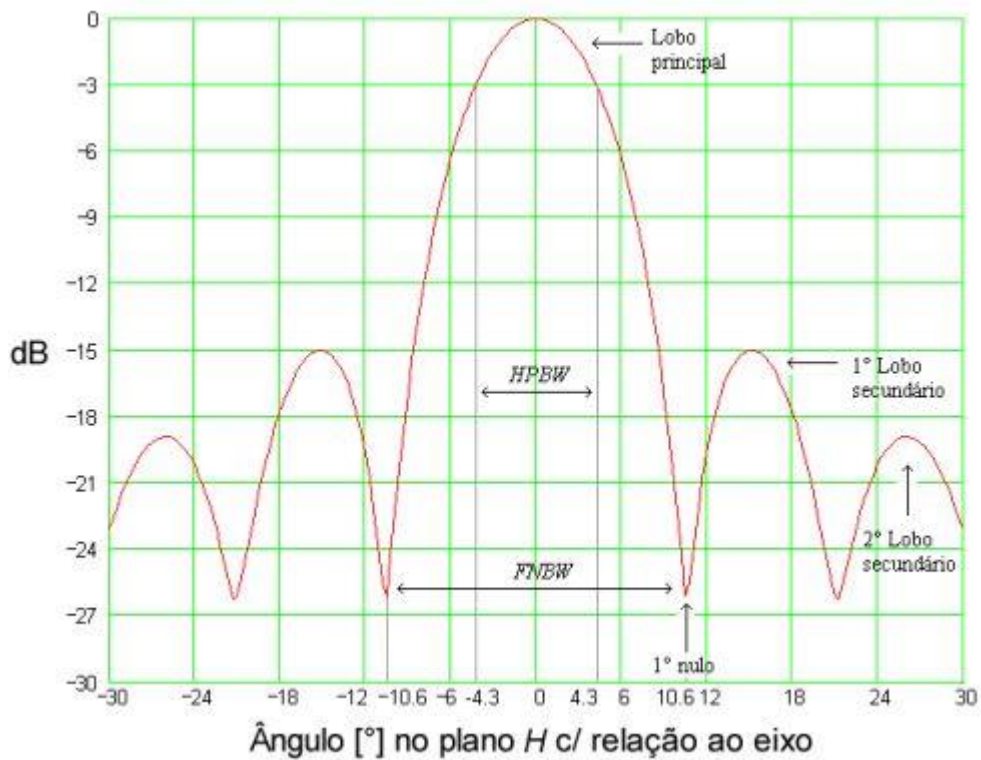


Figura 3.7: Diagrama de radiação retangular

A figura acima mostra o diagrama de irradiação de uma Antena Parabólica operando em 1GHz. O ângulo na abscissa do gráfico é o ângulo plano contido no plano **H** e é medido em relação ao eixo do refletor parabólico. O plano **H** é o plano no qual varia, em consequência da excitação senoidal na frequência de 1GHz, o vetor campo magnético **H** do campo irradiado pela antena parabólica. O Lóbulo Principal contém a direção de máxima irradiação.

Na figura 3.7,  $HPBW = 2 \times 4.3^\circ = 8.6^\circ$  é o *Half Power Beam Width*, isto é, a Largura do Feixe (*beam width*) com centro no máximo de  $F(\theta, \phi)$ dB, largura para a qual a potência irradiada cai à metade (*half power*).

### 3.4 – Diretividade e Ganho

A diretividade é um índice que mede a “habilidade” de uma antena em concentrar a potência irradiada na direção de máxima radiação. Especificamente, mede até que ponto uma antena é capaz de concentrar energia dentro de um ângulo sólido. Este conceito pode ser matematicamente expresso por:

$$D = \frac{U_{max}}{U_{med}} \quad (22)$$

sendo:

- $U_{max}$  é o valor máximo da densidade angular de potência irradiada  $U(\theta, \phi) \left[ \frac{W}{sr} \right]$  que ocorre em  $(\theta, \phi) = (\theta_{maxU}, \phi_{maxU})$ . Ou seja,  $U_{max}$  é o valor máximo da intensidade de radiação da antena.
- $U_{med}$  é a densidade angular de potência irradiada caso a potência **Pa** entregue à antena fosse uniformemente irradiada em todas as possíveis direções do espaço  $\mathcal{R}^3$ , isto é, caso a potência **Pa** fosse irradiada com densidade de potência constante através da superfície de uma esfera de área  $4\pi r^2$ , cujo centro encontra-se a antena. Ou seja,  $U_{med}$  é a Intensidade de Radiação resultante de um Irradiador Isotrópico alimentado pela mesma potência **Pa** entregue à antena em (a), ambas situadas nas mesmas coordenadas no espaço  $\mathcal{R}^3$ .

A diretividade de uma antena é a razão entre o ângulo sólido total de uma esfera ( $4\pi$  [sr]) pelo Ângulo Sólido do Feixe  $\Omega_a$  da antena, expressa matematicamente por:

$$D = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \int_{\phi=0}^{\phi=2\pi} \int_{\theta=0}^{\theta=\pi} P(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi} = \frac{1}{\frac{1}{4\pi} \Omega_a} = \frac{4\pi}{\Omega_a} \quad (23)$$

É importante notar que, por exemplo, um monopólio aterrado apresenta o dobro da diretividade de um dipolo de mesmas dimensões. Isso ocorre devido ao limite de integração de  $\theta$  ser  $\frac{\pi}{2}$  em razão do padrão de irradiação do monopolo (irradia em um só hemisfério).

As antenas de alta diretividade em geral apresenta lóbulo principal estreito e lóbulos secundários reduzidos, como é o caso da antena parabólica. Nessa situação, a Diretividade  $D = \frac{4\pi}{\Omega_a}$  pode ser determinada aproximando-se o ângulo sólido do feixe  $\Omega_a$  pelo produto dos ângulos de meia potência  $HPBW_\theta$  e  $HPBW_\phi$ , relativos a dois planos ortogonais, cuja interseção é a direção de máxima radiação:



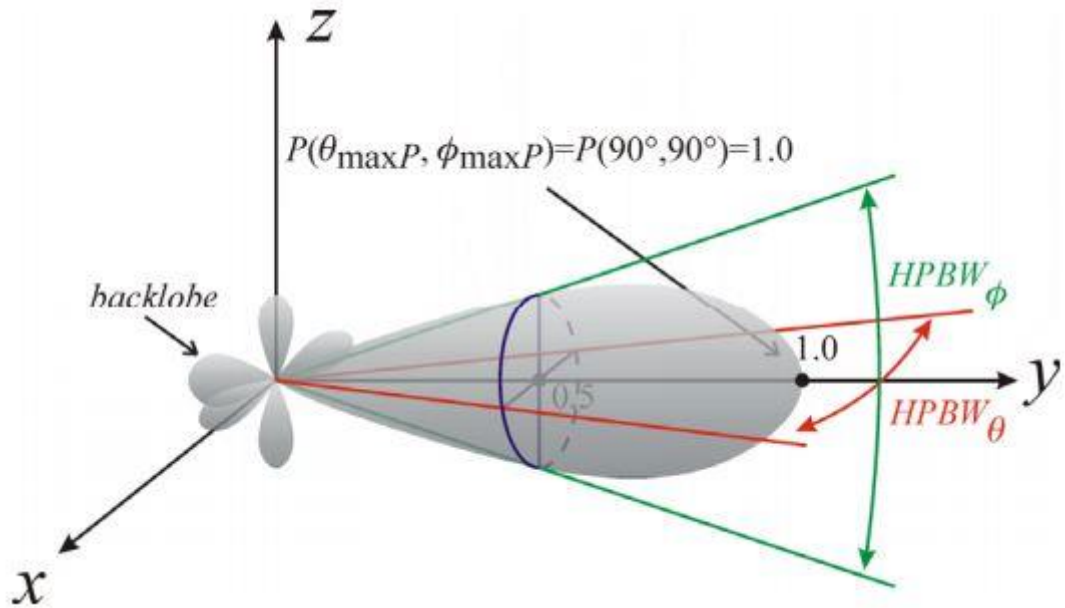


Figura 3.8: Aproximação da diretividade  $D$  pelo produto  $HPBW_{\theta}$  e  $HPBW_{\phi}$

### 3.5 – Impedância de Entrada

Antes de ser apresentado o conceito de impedância de entrada de uma antena se faz necessário definir linhas de transmissão e ressoador. Uma linha de transmissão é um dispositivo para transmitir ou guiar energia de radiofrequência de um ponto a outro. Comumente é desejável transmitir a energia com um mínimo de atenuação, sendo as perdas tão pequenas quanto possíveis.

Um gerador conectado a uma linha de transmissão sem perdas produz uma onda progressiva uniforme ao longo da linha. Se a linha for curto-circuitada, aparece uma onda estacionária devida à interferência das ondas incidente e refletida. Ao longo de uma onda estacionária é possível observar máximos e mínimos da onda. Se a onda refletida for igual à onda incidente, temos uma onda estacionária pura. [11] A energia ao longo da onda oscila de totalmente elétrica a totalmente magnética, duas vezes por ciclo. Tal comportamento de energia é característico de um circuito ressonante ou ressoador. Embora o termo ressoador, no seu sentido mais geral, possa ser aplicado a qualquer dispositivo com ondas estacionárias, é comumente reservado para dispositivos com altas concentrações de energia armazenadas comparadas com os fluxos de entrada e de saída de energia.

Para o modelo genérico de uma linha de transmissão apresentado na figura 3.9,  $Z_0$  é a impedância característica,  $Z_c$  a impedância da carga a qual a linha está conectada e  $\Delta x$  o comprimento da linha. Para entender melhor o conceito de impedância característica, é sugerido um circuito equivalente para um trecho da linha de transmissão, como a figura 3.10

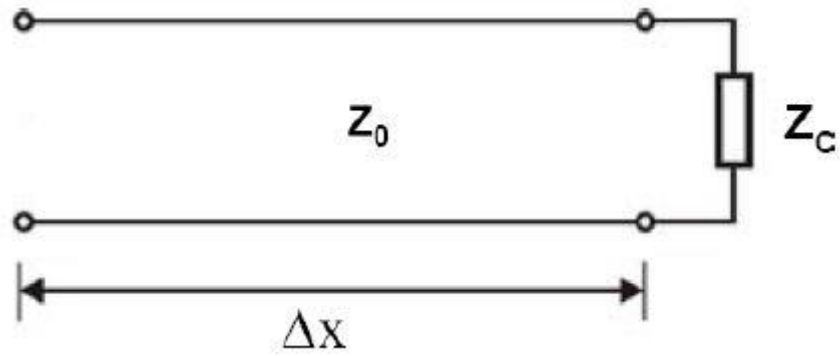


Figura 3.9: Um exemplo de linha de transmissão

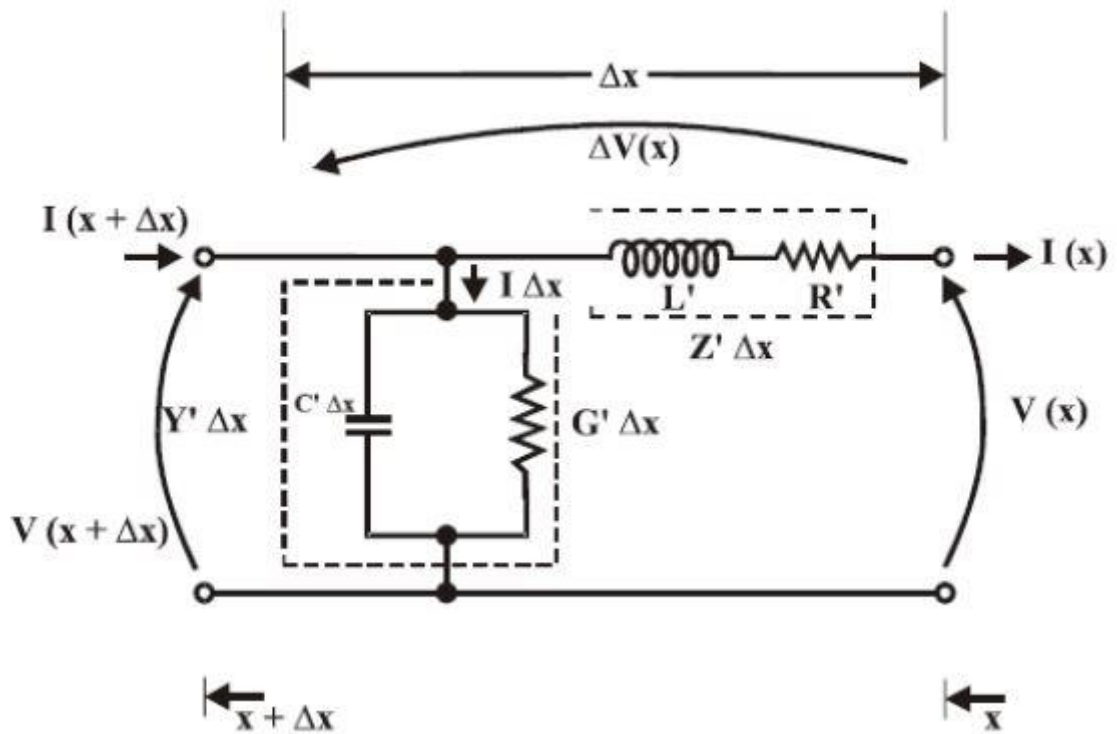


Figura 3.10: Circuito equivalente para linha de transmissão

Sabendo que a definição de impedância em um circuito é a razão entre tensão, nos terminais, e a corrente, que flui no circuito, e levando em consideração o circuito equivalente proposto na figura 3.10, a impedância característica da linha de transmissão pode ser definida como:

$$\frac{V}{I} = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L}{G' + j\omega C'}} = Z \quad (24)$$

sendo  $I$  e  $V$ , respectivamente, a corrente e tensão em algum ponto, e  $R'$ ,  $L'$ ,  $G'$  e  $C'$ , são, respectivamente, resistência, indutância, condutância e capacitância por unidade de comprimento.

Para uma linha de transmissão sem pedas,  $R' = 0$  e  $G' = 0$ , portanto:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (25)$$

Ao longo da linha de transmissão, a relação entre a tensão total e a corrente total é alterada conforme a variação da distância em relação à carga, e pode ser expressa como:

$$Z(x) = Z_0 \frac{Z_c + jZ_0 \tan \beta x}{Z_0 + jZ_c \tan \beta x} \quad (26)$$

em que  $\beta$  é o número de onda e  $\lambda g$  o comprimento de onda guiado:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda g} \quad (27)$$

Geralmente, nem toda a energia transferida para a antena é irradiada pela mesma.

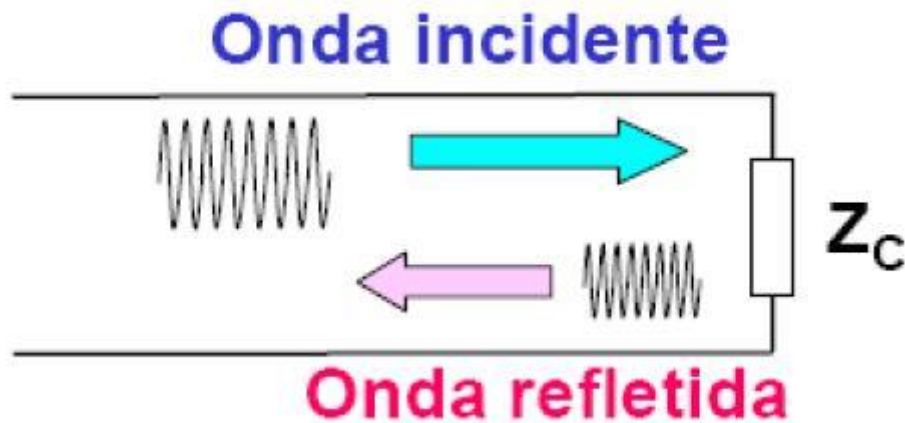


Figura 3.11: Onda incidente e onda refletida

Para uma linha de transmissão de comprimento  $l$ , sem perdas, com impedância característica  $Z_0$  e terminada por uma impedância de carga  $Z_c$ , conforme mostrado na Figura 3.11, o coeficiente de reflexão na carga ( $\Gamma$ ) representa o quanto da onda incidente é refletida pela carga e é expresso como:

$$\Gamma = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (28)$$

Para que o coeficiente de reflexão seja o menor possível, é necessário que  $Z_c$  tenha o valor mais próximo de  $Z_0$ . Se os valores de  $Z_c$  e  $Z_0$  são iguais, dizemos que há um “casamento de impedância”.

Representando a tensão e corrente nos terminais de entrada da antena isolada por  $I_A$  e  $V_A$ , respectivamente, a impedância de entrada é a impedância  $Z_A$  que a antena apresenta à linha de transmissão ou à estrutura de acoplamento que a une à linha de transmissão, conforme mostrado na figura 3.12:

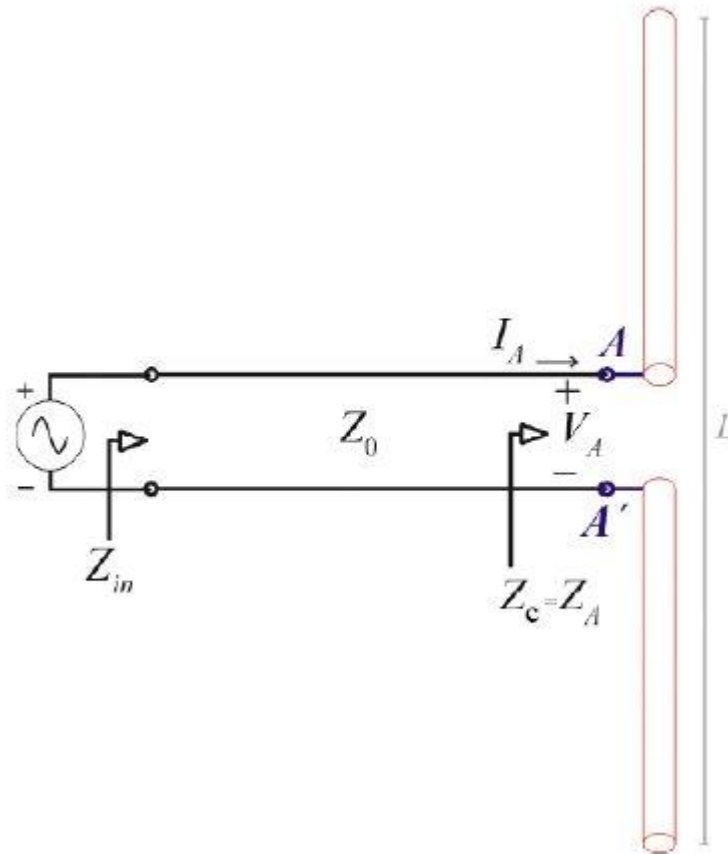


Figura 3.12: Antena Dipolo alimentada por uma linha de transmissão de impedância característica  $Z_0$

Se a antena está isolada eletricamente (afastada de qualquer objeto eletricamente condutor e de dimensões comparável ao da antena) e a antena é considerada sem perdas (construída por condutores de alta condutividade e material dielétrico de baixa perda) sua impedância de entrada é igual a sua impedância própria referida aos terminais  $A$  e  $A'$ , expressa por:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = R_A + jX_A \quad (29)$$

em que  $R_A$  é a resistência de radiação da antena e  $X_A$  a reatância própria da antena, ambas referidas aos terminais  $A$  e  $A'$ .

O conhecimento da impedância de entrada de uma antena é de fundamental importância, pois é responsável pela eficiência com que se efetua a transferência de energia do transmissor para a antena (ou vice-versa), devido ao desejado “casamento de impedância”, isto é,  $\Gamma = 0$ . [10]

Para representar esta impedância da antena geralmente é utilizado uma Carta de *Smith*. De uma maneira mais específica para o uso de antenas, a Carta de Smith é uma forma de

representar a relação entre a impedância da carga, no caso a antena, e a fonte, no caso a linha de transmissão que a antena será conectada.

### 3.6 – Parâmetro de Espalhamento (Parâmetros S)

Circuitos lineares, operando com baixo sinal, podem ser caracterizados completamente pelos parâmetros medidos em seus terminais, sem o conhecimento prévio de sua constituição interna. A definição dos parâmetros lineares pode ser feita utilizando-se estruturas n-portas. Aqui será apresentada uma estrutura de quatro terminais (quadripolo), conforme figura 3.13.

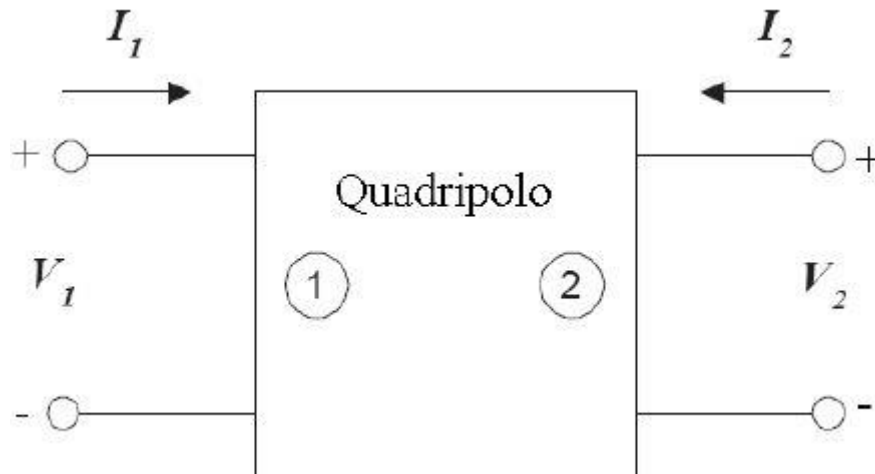


Figura 3.13: Esquemático de um Quadripolo

Os parâmetros S, ou parâmetros de espalhamento, representam uma relação entre as ondas incidentes e as ondas refletidas nos terminais do quadripolo. A figura 3.14 mostra um quadripolo, sendo representado pelas tensões aplicadas e pelas ondas incidentes e refletidas nas portas 1 e 2.

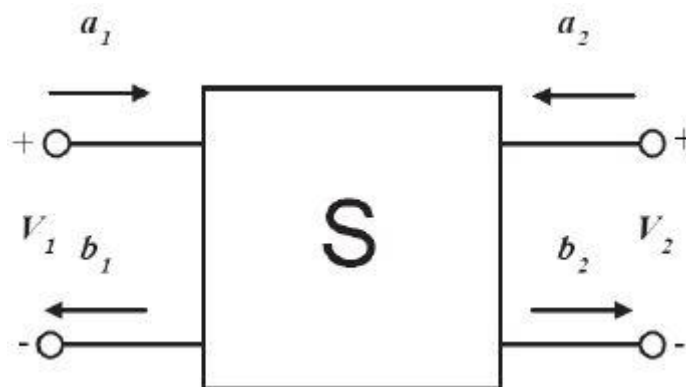


Figura 3.14: Representação do parâmetro S

Considerando o quadripolo mostrado na figura 3.14 por um de seus parâmetros lineares, como, por exemplo, o de admitância (parâmetro Y), pode-se escrever:

$$I_1 = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \quad (30)$$

$$I_2 = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \quad (31)$$

em que,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $V_1$  e  $V_2$  representam as correntes e tensões totais nos terminais do quadripolo.

$$V_1 = E_{i1} + E_{r1} \quad (32)$$

$$V_2 = E_{i2} + E_{r2} \quad (33)$$

$$I_1 = \frac{E_{i1} - E_{r1}}{Z_0} \quad (34)$$

$$I_2 = \frac{E_{i2} - E_{r2}}{Z_0} \quad (35)$$

Em que  $E_{i1}$ ,  $E_{r1}$ ,  $E_{i2}$  e  $E_{r2}$  representam, respectivamente, as tensões das ondas incidentes e refletidas nas linhas de entrada e saída.  $Z_0$  é a impedância característica das linhas.

Substituindo (31), (32), (33) e (34) em (29) e (30), pode-se arranjar as equações de modo que as tensões incidentes sejam as variáveis independentes e as tensões refletidas as variáveis dependentes. Uma vez dito isso, tem-se o seguinte resultado:

$$E_{r1} = g_{11}(Y)E_{i1} + g_{12}(Y)E_{i2} \quad (36)$$

$$E_{r2} = g_{21}(Y)E_{i1} + g_{22}(Y)E_{i2} \quad (37)$$

Os parâmetros  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{21}$  e  $g_{22}$  dependem apenas dos parâmetros  $Y$  e representam um novo conjunto de parâmetros caracterizando o quadripolo através de tensões incidentes e refletidas, o que é mais natural no domínio de alta frequência e micro-ondas.

Normalizando as equações (35) e (36) por  $\sqrt{Z_0}$ , pode-se escrever:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (38)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (39)$$

equações estas que podem ser escritas de forma matricial, resultado em:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

A matriz  $\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}$  é chamada de matriz  $S$  (do inglês *Scattering*) do quadripolo ou matriz de espalhamento (porque relaciona ondas refletidas e incidentes). Os parâmetros de espalhamento definem as características (identidade) dos dispositivos de  $n$ -portas.

### 3.7 – Largura de Banda

Os parâmetros das antenas mencionados anteriormente caracterizam o funcionamento das mesmas em uma única frequência. Como em um sistema de comunicações se utilizam sinais com determinada largura de banda, um parâmetro importante das antenas é a sua largura de banda de frequências de operação, em cujos limites os outros parâmetros da antena não excedem valores permitidos, estabelecidos por requisitos técnicos.

Os limites da banda de frequências de operação são determinados por qualquer um dos parâmetros dependentes da frequência. A largura de banda se define, por exemplo, pelo comportamento da impedância de entrada da antena, isto é, o coeficiente de onda estacionária na linha de alimentação deve se limitar abaixo de um determinado valor ao se variar a frequência. A definição da banda também pode ser em função da variação da direção de máximo do diagrama de radiação, da variação da largura de feixe, da diminuição da diretividade, do aumento dos níveis de lóbulos laterais, etc.

Convencionalmente se considera de banda estreita as antenas com banda de frequências de operação menor do que 10% da frequência nominal. As antenas de banda larga podem ter uma largura de banda desde 10% até 50%. As antenas com bandas maiores, da ordem de uma ou várias oitavas, se denominam de multibandas. E, finalmente, se a relação dos limites superior e inferior chega a 5:1 ou maior, a antena pode ser considerada como independente da frequência.

#### **4. Análise do Laboratório de Antenas do Departamento de Engenharia Elétrica**

O objeto de estudo desse trabalho foi mostrar as reais condições de trabalho no Laboratório de Antenas. Por ser composto de equipamentos antigos, foram realizados testes para poder ser observado o estado dos equipamentos e antenas existentes no laboratório. Uma vez feito esse estudo, será realizado os reparos e aquisições necessárias para que, em semestres futuros, seja ofertado a disciplina de Antenas: Parte Teórica e Prática.

O objetivo inicial seria realizar medições e experimentos práticos utilizando tantos os equipamentos da *Scientific Atlanta*, que serão detalhados a seguir, quanto o da Agilent (FieldFox RF Analyzer – N9912A), adquirido para realização de experimentos referentes à disciplina de Antenas: Teoria e Prática.

Em um primeiro contato com o Laboratório de Antenas, pôde-se perceber a situação que se encontra os equipamentos e atuais antenas, inviabilizando, em um primeiro momento, a realização de medições, objetivo inicial desse trabalho. Portanto, por estar desatualizado e com alguns equipamentos de vital importância para medições, teve-se como foco para esse trabalho, uma análise da atual infraestrutura do Laboratório de Antenas, com o objetivo de demonstrar a situação dos atuais equipamentos e, a partir dessa análise, poder ser possível detalhar de maneira precisa o que é necessário para que, em semestres posteriores, seja possível realizar experimentos referentes às disciplinas de antenas, sistemas de comunicações e também em possíveis trabalhos de conclusão de curso.

##### **4.1 – Características do Sistema de Transmissão e Recepção**

Nesse tópico será feita descrições do sistema de controle de posição da *Scientific Atlanta*, sendo descrito cada equipamento que compõe o sistema em questão, assim como sua operação em conjunto, utilidade e reparos a serem feitos para um completo funcionamento do sistema para trabalhos futuros envolvendo experimentos de envio e recepção de sinais com antenas.

Esse sistema é formado pela bancada de controle do pedestal, o pedestal, que fica no telhado do SG11 (Laboratório de Antenas) e por um bolômetro (potência), utilizado como um pré-amplificador do plotter.

Visto que esse sistema é antigo e consegue operar em frequências limitadas de até 2GHz, o *FieldFox* é capaz de transmitir e receber o sinal transmitido, funcionamento como um resumo mais eficaz e moderno de todo o sistema, sendo capaz de nos dar os Diagramas de Radiação, Impedância de Entrada entre outros requisitos de uma antena.

## 4.2 – Unidade de Controle Remoto

A unidade de controle remoto, ou também, a bancada de controle do pedestal, modelo 4116-A-10 da Scientific Atlanta, permite controlar, à distância, o azimute e a elevação do posicionador de três eixos da antena. Ela controla a velocidade e a direção do posicionador. O sistema é constituído ainda de um freio dinâmico para prever o choque excessivo quando os limites de posição são atingidos (no caso da elevação).

Esse sistema é limitado para medições em até 2GHz e, conforme é mostrado na tabela a seguir, tem-se uma lista com a descrição dos controles do painel e dos indicadores.

Controle	Descrição
Chave on/off	Liga/Desliga o equipamento, possui lâmpada indicadora.
Controle de velocidade	Determina a velocidade e direção com que o posicionador gira.
Seletor de modo	Determina qual eixo o posicionador será controlado.

Tabela 1: Descrição dos Controles da Unidade de Controle Remoto



Figura 4.1: Unidade de Controle Remoto com os cursores de Azimute, Elevação e Polarização

O maior empecilho encontrado durante a realização desse trabalho, que inviabilizou o objetivo inicial de realizar testes com medições em até 6GHz utilizando o equipamento portátil *FieldFox* foi que, durante um primeiro teste na unidade de controle remoto, foi visto que o posicionador, descrito no tópico seguinte, não se encontrava em perfeito estado de condição.

## 4.3 – Posicionador (Azimute e Elevação)

O ângulo de Azimute refere-se à direção onde o norte é igual a 0° e é medido no sentido horário em relação ao norte. O azimute varia entre 0° e 360°. O ângulo de Elevação é o ângulo entre o plano horizontal e a direção apontada pela antena.



Esta parte do equipamento possui dois eixos ortogonais que permitem a simulação do movimento de um sensor em coordenadas esféricas. Em adição tem um suporte básico para antenas de micro-ondas.

Os posicionadores de azimute e de polarização são normalmente utilizados para realização de medidas de polarização em antenas. Todo o conjunto é selado para ajudar a prevenir a entrada de umidade e poeira.

Recomenda-se que o posicionador seja operado sem qualquer carga durante o procedimento de *check-out* inicial. O sentido de rotação correto, a resposta de controle de velocidade e interruptor de limite de operação devem ser verificadas anteriormente. Assegurar que os cabos de controle estão conectados corretamente antes de tentar operá-lo.

Todos os eixos são equipados com redutores de velocidade. Essas unidades são lubrificadas com óleo.

A dificuldade encontrada durante a realização desse trabalho que inviabilizou a conclusão dos objetivos iniciais foi que o posicionador em questão não realizava os comandos de rotação e azimute no sentido anti-horário. Ao ser constatado esse problema, teve-se início a uma tentativa de conserto desse equipamento, sendo verificado as partes internas, com o auxílio do manual *Medium Duty Positioners*, presente no Laboratório de Antenas ENE/UnB.

Numa primeira tentativa de conserto, com a colaboração de um técnico da UnB, e com o auxílio do manual, vimos que ao ser ligado a Unidade de Controle Remoto do Posicionador, esta deveria realizar uma busca para ver em qual posição inicial o Posicionador estaria, nos indicadores de *Azimuth*, *Elevation* e *Polarization* e que as luzes de indicação *Reverse* e *Forward* deveriam acender durante o movimento do cursor *Speed Control*, mostrados na figura 4.2.

Ao analisarmos o Posicionador, observamos que o conector responsável por essas ações, de número 42, conforme mostrado na figura abaixo, estava desconectado. Ao ser conectado, as ações citadas voltaram a funcionar de maneira correta.



Figura 4.2: Conectores responsáveis pelos comandos do Posicionador

As tentativas de conserto, para que fosse possível realizar os comandos de *Azimuth* e *Elevation* no sentido anti-horário, começaram pela troca dos fusíveis encontrados na Unidade de Controle, não tendo êxito. A partir disso, foram realizadas diversas abordagens diferentes para o conserto, como a análise e troca dos capacitores de partida e inversão de alguns conectores mostrados na figura 4.2, não tendo sucesso.

Essa falha no conserto do Posicionador, como dito anteriormente nesse trabalho, inviabilizou o objetivo inicial desse trabalho, de realizar medições em frequências de até 6GHz.

#### 4.4 – Seletor de Sincronismo (modelo 1588)

Acessório opcional do equipamento para medidas de antenas da série 1580 da *Scientific Atlanta*. Sua finalidade é prover um meio conveniente para a seleção de um dos quatros tipos de movimento: horizontal ou vertical, com razões de 1:1 ou 36:1.

#### 4.5 – Transmissor (*Scientific-Atlanta Model 2151B Control Unit and Mainframe*)

Emite um sinal padrão para uma antena transmissora padrão. Permite o controle da frequência do sinal gerado. Os indicadores do transmissor são descritos na tabela a seguir:

Controles	Descrição
Power	Encontrado na parte frontal do equipamento, o controle é usado para aplicar e remover a tensão AC do equipamento. Quando a tensão AC for aplicada na unidade, uma luz de indicação será acesa.
Modulação	Gera uma palavra digital que é transmitida para o <i>Mainframe</i> e liga a modulação do circuito.
Ajuste Digital/Analógico	Quando se está no Ajuste Digital muda-se a frequência de acordo com a informação digital. Já no Ajuste Analógico, a frequência pode ser ajustada para uma tensão de 0V a 10V no conector J4, encontrado no painel frontal.
INT. TRIG/ EXT. TRIG	É usado em conjunto com o modo de operação <i>SWEEP</i> . Quando se encontra na posição <i>EXT. TRIG.</i> , uma lógica “TTL” é requerida no painel frontal para começar e parar o ciclo.
SWEEP 1/ SWEEP 2	Quando pressionada e uma luz não estiver acesa, a função estará desligada. Uma palavra digital é transmitida para o <i>Mainframe</i> .
Comutador de frequência	São 5 algarismos para a entrada de dados. Pode ser comutado numa relação de 1MHz por passo.
Ajuste fino	Potenciômetro que faz um ajuste fino da frequência do transmissor.

Tabela 2: Descrição dos Controles do Transmissor

Conectores	Função
J1, 25 Pin <i>Amphenol 17-80250-16</i>	Esse conector serve como uma entrada/saída de computador para controlar a fonte de sinal. Existe uma sinalização para falha.
J2, 25 Pin <i>Amphenol 17-80250-16</i>	Conector de interfaces com um receptor <i>Scientific-Atlanta</i> . Contém dados de banda e uma tensão analógica de 0V a 10V que representa a frequência em porcentagem da banda.
J3, BNC, Painel Traseiro UG657	Esse conector serve para acionar as saídas <i>EXT TRIG/SYNC OUT</i> .
J4, BNC, Painel Frontal UG657	Conectado em paralelo com o conector J3.
J5, BNC, Painel Traseiro UG657	Frequência analógica: a tensão de sintonização muda a frequência do oscilador e é conectada ao pino J5.

Tabela 3: Função dos conectores

Os conectores descritos na Tabela 3 são mostrados a seguir, encontrados no painel traseiro do transmissor.

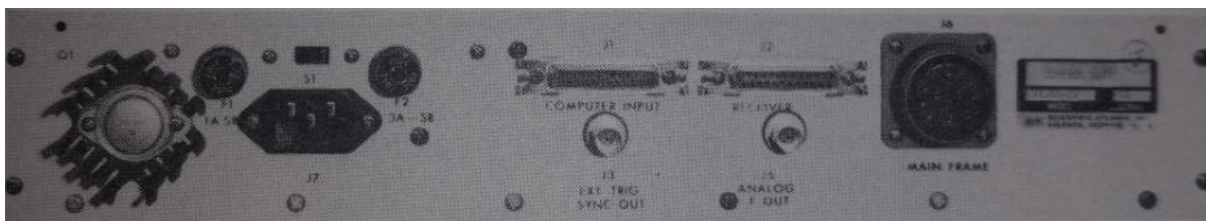


Figura 4.3: Painel traseiro do Transmissor

#### 4.6 – Receptor de Micro-ondas

É o responsável por receber o sinal padrão captado para uma antena a ser testada. O sinal passa por um mixer que o transforma para uma frequência intermediária. O receptor de medidas em micro-ondas é um receptor super-heteródino que provê uma varredura em frequência de banda extremamente larga e com alta sensibilidade, com excepcional linearidade e estabilidade. O modelo em questão tem uma faixa de frequência de 2GHz até 12,4GHz que pode ser expandida para uma faixa de 25MHz até mais de 40GHz com uso de acessórios opcionais. Possui vários tipos de ajustes de ganhos, frequência de recepção e possui ainda um mostrador para indicar o nível do sinal que está sendo recebido. [8]



Figura 4.4: Receptor de Microondas

#### 4.7 – Bolômetro a cristal

Instrumento utilizado para detectar e medir quantidades de radiação eletromagnética em suas várias formas, desde ondas de rádio até a radiação ultravioleta e raios gama. O princípio de funcionamento do bolômetro também foi adaptado para uso em física e detecção de partículas.

O dispositivo é formado por um elemento absorvedor, que pode ser um metal, semicondutor ou um supercondutor, ligado a um reservatório térmico de temperatura fixa. Quando a radiação eletromagnética incide, aumenta a temperatura fazendo com que sua resistência elétrica varie. Medindo essa resistência é possível saber a temperatura do absorvedor e a potência da radiação incidente. [9]

Usado como um pré-amplificador do *plotter*, mostrado na figura 4.4, possui um amplificador sensível que é a entrada de um cristal detector ou um bolômetro detector. [8]

#### 4.8 – Plotter (série 1580)

Módulo usado para gravar permanentemente os dados das medições de antenas ou outros análogos que sejam dados em função da posição, ângulo ou outro parâmetro. Este equipamento recebe os sinais de posição tratados e com ganho controlado pelo Bolômetro a cristal. Para controle do ganho, o plotter gera um sinal que é transmitido ao Bolômetro, que faz o ajuste automático do ganho e envia um sinal BCD ao plotter, indicando o nível de atenuação atual. Com posse destes dados, o plotter traça o diagrama de radiação polar. [8]

Assim como o posicionador, essa função não se encontra operacional, sendo possível realizar as medições de diagramas de radiação, por exemplo, de forma manual. No atual Laboratório, essas medições podem ser realizadas com o equipamento *FieldFox*.

#### 4.9 – Antenas

A maioria das antenas encontradas no laboratório são antenas projetadas e construídas por alunos para a disciplina de Antenas: Teoria e Prática. Como o sistema existente no laboratório é limitado para medições em até 2GHz, as antenas projetadas por alunos se encontram nessa faixa.

As Antenas da fabricante *Scientific Atlanta* são:

1. Antena dipolo série 15, com 2,1 dBi de ganho e frequência de operação de 115 a 200MHz;
2. Antena dipolo série 15, com 2,1 dBi de ganho e frequência de operação de 200 a 350 MHz;
3. Antena dipolo série 15, com 2,1 dBi de ganho e frequência de operação de 350 a 590MHz;
4. Antena log-periódica série 26, com 8 dBi de ganho e frequência de operação de 100MHz a 1GHz;
5. Antena corneta série 12, com ganho de 14,4 dBi a 7,5 dBi e frequência de operação de 1,70GHz a 2,60GHz; e
6. Antena direcional, tipo Yagi, com 10,14dBi e frequência de operação de 220 a 270MHz.

Foram realizadas simulações com o auxílio do *software* 4nec2 com as características das antenas encontradas no laboratório, que serão relatados em tópico específico nesse trabalho. Uma vez que os manuais dessas antenas não se encontram mais no Laboratório de Antenas, é de grande importância ter-se catalogado as frequências, diagramas de radiação, entre outros parâmetros dessas antenas.

#### 4.10 – Cabos

Os cabos instalados no laboratório são capazes de realizar experimentos em frequência de até 6GHz. Até o ano de 2013 seria possível realizar medições com frequências limitadas em até 2500MHz, com os cabos RG213U e RG214U, pois possuem grandes perdas para frequências acima de 2500MHz, conforme relatado na tabela a seguir:

Frequência (MHz)	Perdas (dB/100m)	
	RG213U	RG214U
5	1,4	1,46
25	3,20	3,35
50	4,60	4,82
100	-	8,57
200	9,70	10,24
300	12,15	12,88
435	14,99	15,95
900	22,91	24,61
1250	27,93	30,14
1500	31,24	33,81
1700	33,76	36,61
1800	34,99	37,98
2200	39,72	43,26
2400	41,99	45,8
2500	43,10	47,05

Tabela 4: Perda dos cabos RG213U e RG214U

Diante dessa limitação para realização de experimentos, teve-se uma nova aquisição de cabos que permitissem operação dentro da faixa de frequências de até 6GHz. Portanto, foi adquirido o cabo LDF4-50A, conforme mostrado na tabela 5, que apresenta uma redução considerável das perdas para frequências acima de 2500MHz quando comparados com os cabos demonstrados na tabela 4.

Frequências (MHz)	Perdas (dB/100m)
	LDF4-50A
30	1,17
50	1,52
200	3,10
400	4,46
450	4,75
500	5,02
800	6,46
1000	7,28
1250	8,23
1500	9,09
1700	9,74
1800	10,11
2000	10,7
2200	11,2
3000	13,4
5000	18,0
6000	20,1
8000	23,8
8800	25,2

Tabela 5: Perda no cabo LDF4-50A

#### 4.11 – Agilent FieldFox (N9912A) – Analisador RF

Para realização de medições em frequências mais altas, visto que o sistema *Scientific Atlanta* disponível no laboratório é limitado para medições em até 2GHz, foi adquirido o equipamento da Agilent, FieldFox RF Analyzer – N9912A, que, além de realizar medições em frequências mais elevadas (até 6GHz), consegue realizar uma análise mais eficaz sobre cabos e antenas, podendo ser configurado para incluir um analisador vetorial de espectro de transmissão e reflexão, com 1 porta, e um analisador escalar de redes com 2 portas.

Esse equipamento combina a análise de cabos e antenas, análise de espectro, medições de potência e a análise vetorial de rede em um instrumento robusto, compacto, leve e resistente. Inclui como acessórios padrão: um adaptador CA/CC, bateria, manual do usuário e o software Data Link.



Figura 4.5: Agilent FieldFox portátil

##### Medições:

1. Analisador de cabos e antenas com medições de perda de retorno, perda no cabo com uma porta, distância à falha e VSWR.
2. Tela de análise vetorial de rede (S11, S21, fase e Carta de Smith); e
3. Analisador de espectro incorporado.

##### Calibração:

1. A função *QuickCal* integrada permite calibrar o *FieldFox* sem usar um kit de calibração, oferecendo a garantia de precisão e a repetibilidade;
2. A calibração imediata do *Fieldfox* com a função *CalReady* coloca a calibração da unidade disponível na porta de teste imediatamente após o instrumento ter sido ligado;
3. Calibração em banda larga com interpolação automática, para eliminar a necessidade de repetir a calibração do *FieldFox* quando houver alteração na frequência do teste ou o número de pontos; e
4. Suporte mecânico à calibração com terminais abertos, em curto e com carga.

### Principais especificações:

1. Analisador de cabos e antenas – 2MHz a 4GHz, com 6GHz;
2. Diretividade: > 42dB (Velocidade da medição: 1,5ms/por ponto);
3. Analisador de espectro – 100kHz a 4GHz, com 6GHz opcional: -148dBm, 1 segundo/span total (6GHz); e
4. Medidor de potência – 9kHz a 24GHz (operando com modelos específicos de sensores de potência da *Agilent*). [6]

## 5. Simulações Computacionais

As simulações foram realizadas com o *software* livre *4nec2*. *NEC (Numerical Electrical Code)* é um método de simulação para antenas de fio, desenvolvido pela *Lawrence Livermore Laboratory*.

Para otimização das antenas nesse *software*, a antena é dividida em segmentos curtos com uma variação de corrente e tensão linear, conforme acontece em outros simuladores de circuito, como por exemplo o *SPICE*.

O *4nec2* oferece uma enorme quantidade de possibilidades e opções, incluindo display 3D dos resultados e suas principais vantagens são as ferramentas de otimização dos parâmetros das antenas.

Serão realizadas simulações de acordo com os parâmetros das antenas do Laboratório de Antenas, conforme especificado no tópico 4.2. Por ter disponível no laboratório 3 antenas dipolo com frequências diferentes, foram realizadas simulações com a frequência mínima possível, de 115MHz e a máxima possível, de 590MHz.

### 5.1 – Antena Dipolo

A antena do tipo dipolo consiste em dois condutores, contendo em seu comprimento total o tamanho da onda que se deseja captar, dependendo da frequência de operação e necessidade técnica, podem ser utilizadas antenas dipolo de meia onda, que contêm o tamanho da metade do comprimento da onda. De forma mais simples, uma antena dipolo é uma antena retilínea sem ligação com o potencial de terra, com a extensão de um comprimento de onda em geral.



Figura 5.1: Antena Dipolo do Laboratório de Antenas – Frequência 350 a 590MHz

A simulação a seguir foi realizada tomando em consideração a menor frequência possível através das antenas dipolo do Laboratório, de 115MHz, e serão mostrados os parâmetros da antena, os diagramas de radiação vertical, horizontal e em uma modelagem tridimensional.

Filename	dipoloSimples.out	Frequency	115	Mhz
		Wavelength	2.607	mtr
Voltage	4633 + j 0 V	Current	0.02 + j 3.47 A	
Impedance	8.28 - j 1333	Series comp.	1.845	uH
Parallel form	2.e5 // - j 1333	Parallel comp.	1.845	uH
S.W.R.50	4299	Input power	100	W
Efficiency	90.11	Structure loss	9.888	W
Radiat-eff.	89.71	Network loss	0	uW
RDF [dB]	1.81	Radiat-power	90.11	W

Figura 5.2: Parâmetros da Antena Dipolo – 115MHz

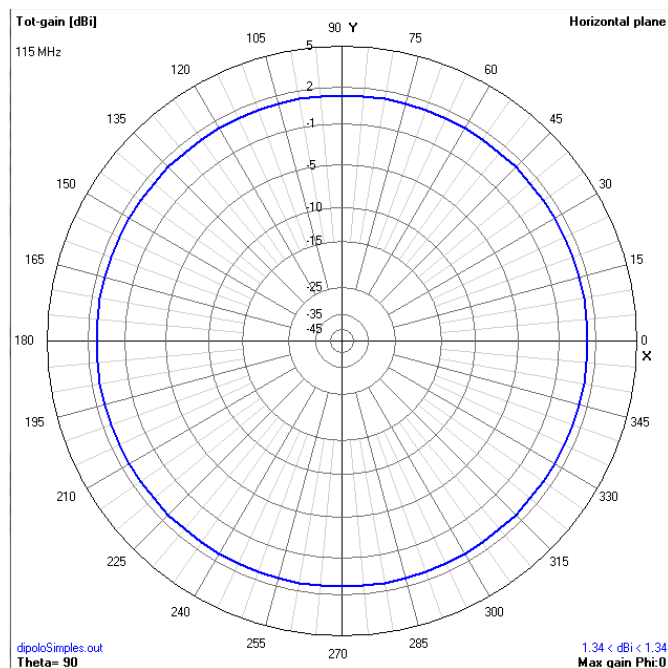


Figura 5.3: Diagrama de Radiação Horizontal de uma Antena Dipolo



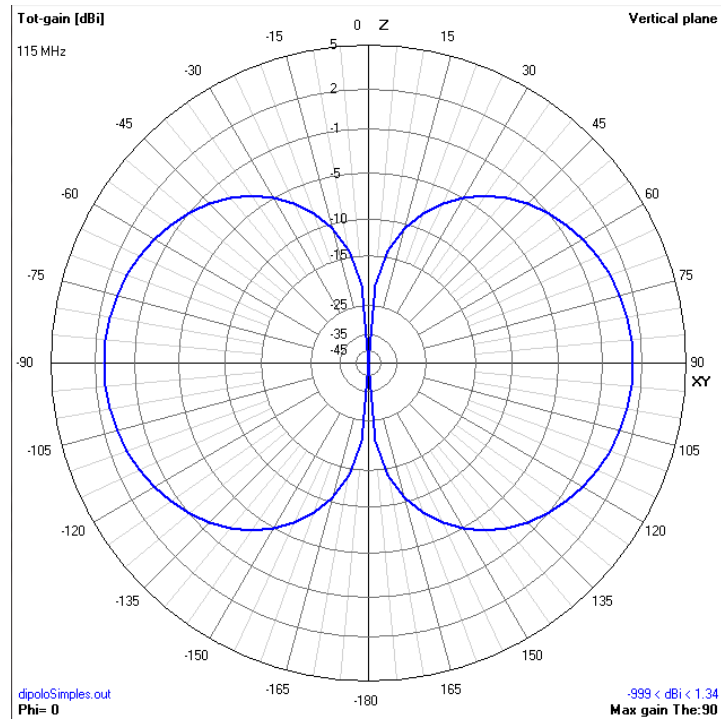


Figura 5.4: Diagrama de Radiação Vertical de uma Antena Dipolo

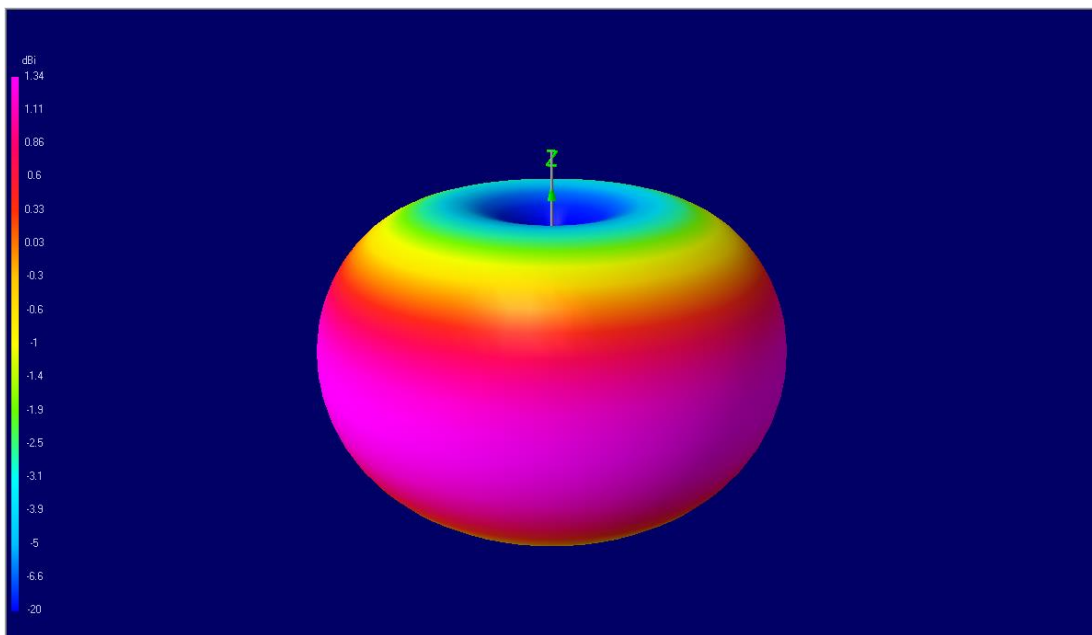


Figura 5.5: Diagrama de Radiação Tridimensional de uma Antena Dipolo

## 5.2 – Antena Log-Periódica

O termo Log-Periódica tem origem na propriedade deste tipo de antena exibir características de radiação que são repetitivas (ou periódicas) em função do logaritmo da frequência de operação dentro de uma faixa de funcionamento. Pode ser implementada nas faixas de VHF (*Very High Frequency*) e UHF (*Ultra High Frequency*), operando segundo a

orientação mecânica dos seus elementos em polarização linear horizontal ou linear vertical, mediante a incorporação de uma segunda antena mecanicamente a  $90^\circ$  e alimentada em quadratura de fase (defasada de  $90^\circ$ ) com a primeira. A antena Log-Periódica pode ser implementada para operação em polarização circular.



Figura 5.6: Antena Log-Periódica

Quanto maior for a quantidade de elementos, maior será o ganho e vice-versa. É importante notar ainda que, quanto maior for o ganho mecanicamente, maior e mais pesada será a antena, bem como maior a área de exposição ao vento. Os parâmetros e diagramas de radiação são mostrados a seguir:

Filename	Logp54_216MHz.ou	Frequency	100	Mhz
		Wavelength	2.998	mtr
Voltage	244 + j 0 V	Current	410 + j 269 mA	
Impedance	417 - j 273	Series comp.	0.435	uH
Parallel form	596 // -j 908	Parallel comp.	1.445	uH
S.W.R.50	12	Input power	100	W
Efficiency	100	Structure loss	0	uW
Radiat-eff.	99.44	Network loss	6.e-8	uW
RDF [dB]	6.11	Radiat-power	100	W

Figura 5.7: Parâmetros da Antena Log-Periódica – 100MHz

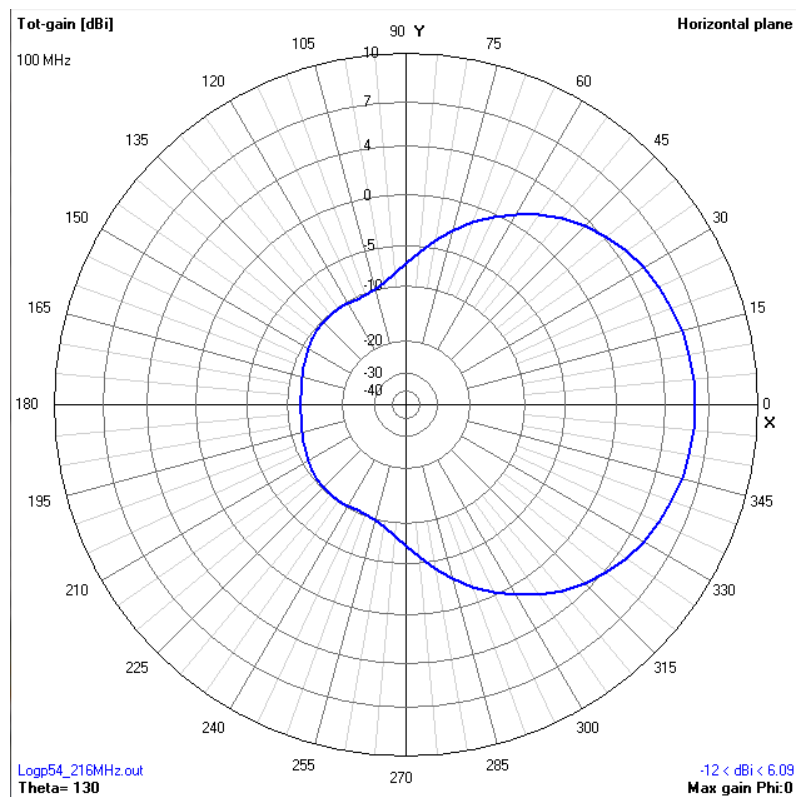


Figura 5.8: Diagrama de Radiação Horizontal de uma Antena Log-Periódica

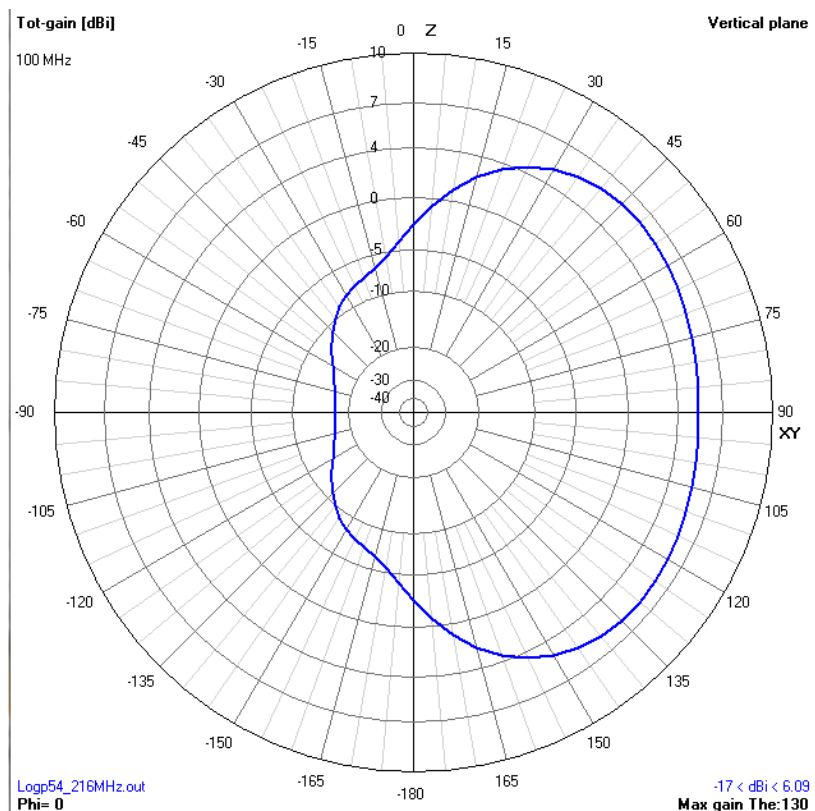


Figura 5.9: Diagrama de Radiação Vertical de uma Antena Log-Periódica

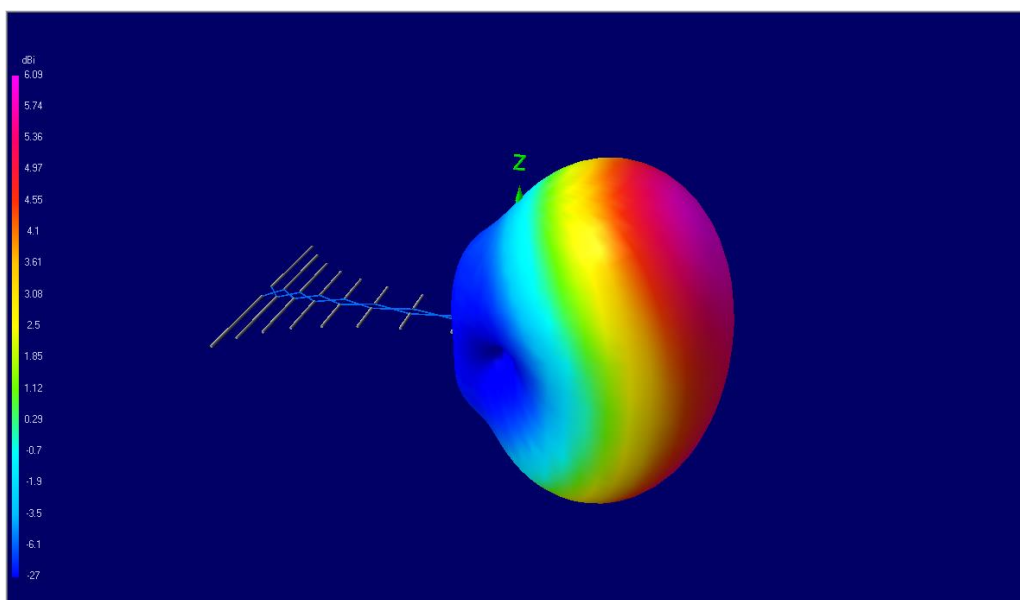


Figura 5.10: Diagrama de Radiação Tridimensional de uma Antena Log-Periódica

### 5.3 – Antena Yagi

Conjunto de antenas lineares, constituído de dipolos, onde apenas um é excitado e os demais são elementos parasitas. Muito utilizada na prática por ser leve, de baixo custo, de fácil

construção, por apresentar grande diretividade e ganho considerável. Pode operar como transmissor ou receptor, sendo muito aplicada como antena de TV e de celular.

Por essas especificações se tornou uma das antenas mais utilizadas em sistemas de telecomunicações. Foi primeiramente descrita e analisada em um artigo do professor japonês S. Uda, em março de 1926, motivo por ser conhecida também como Antena Yagi-Uda.

A sua estrutura é composta por dipolos, sendo um elemento excitador, um elemento refletor e os demais elementos parasitas ou diretores. Estes elementos destinam, respectivamente, a excitar a onda eletromagnética, refleti-la na máxima radiação desejada e dirigi-la também nesta direção preferencial.

O elemento excitador é alimentado diretamente por uma fonte de corrente (ou de tensão), normalmente o seu tamanho é menor que o refletor e maior que os diretores. Por fim, os diretores são elementos parasitas, cujos tamanhos variam de acordo com a distância entre os elementos, o número destes, a espessura e a largura de banda pretendida.

Nesse arranjo de dipolos, a onda eletromagnética emitida pelo excitador induz uma corrente no parasita que, por sua vez, re-irradia parte da energia recebida. A fase da corrente neste elemento depende do seu comprimento e da distância de separação entre ele e o elemento ativo. Esta fase, combinada com a amplitude da corrente, determina o diagrama de radiação da rede. O campo distante da Yagi é, assim, a soma dos campos emitidos pelo excitador e parasita.

As simulações desse modelo de antena são mostradas a seguir, com os parâmetros, geométrica e diagramas de radiação, respectivamente. A antena yagi do laboratório ainda se encontra lacrada numa caixa, por isso não se tem uma figura desta.

Filename	Yagi16Elementos.ou	Frequency	220	Mhz
		Wavelength	1.363	mtr
Voltage	86.7 + j 0 V	Current	1.15 - j 0.55 A	
Impedance	61.4 + j 29.1	Series comp.	24.87	pF
Parallel form	75.1 // j 159	Parallel comp.	4.564	pF
S.W.R. 50	1.74	Input power	100	W
Efficiency	100	Structure loss	0	uW
Radiat-eff.	99.42	Network loss	0	uW
RDF [dB]	9.91	Radiat-power	100	W

Figura 5.11: Parâmetros da Antena Yagi – 220MHz

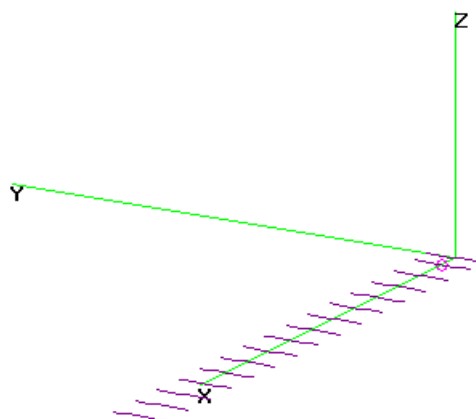


Figura 5.12: Geometria da Antena Yagi – 16 elementos

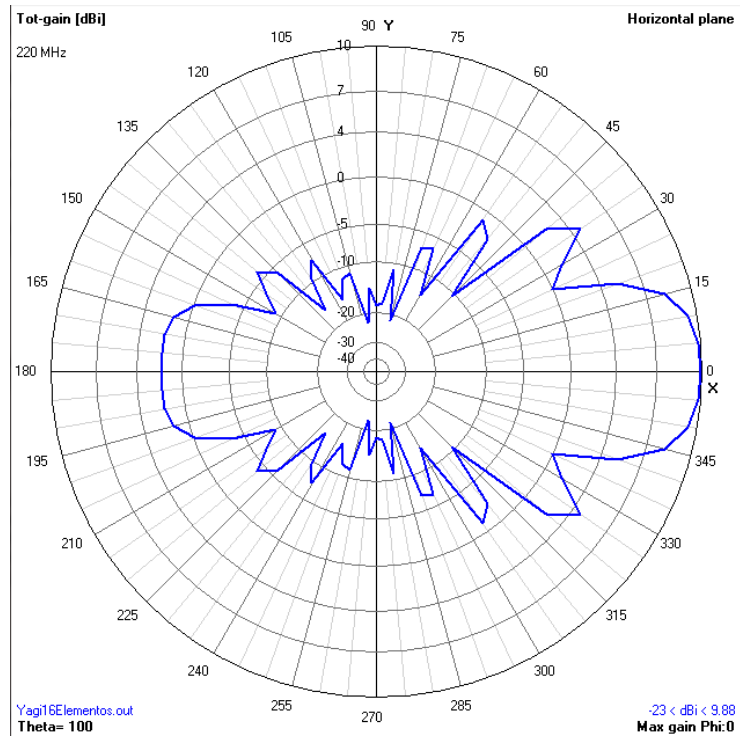


Figura 5.13: Diagrama de Radiação Horizontal de uma Antena Yagi

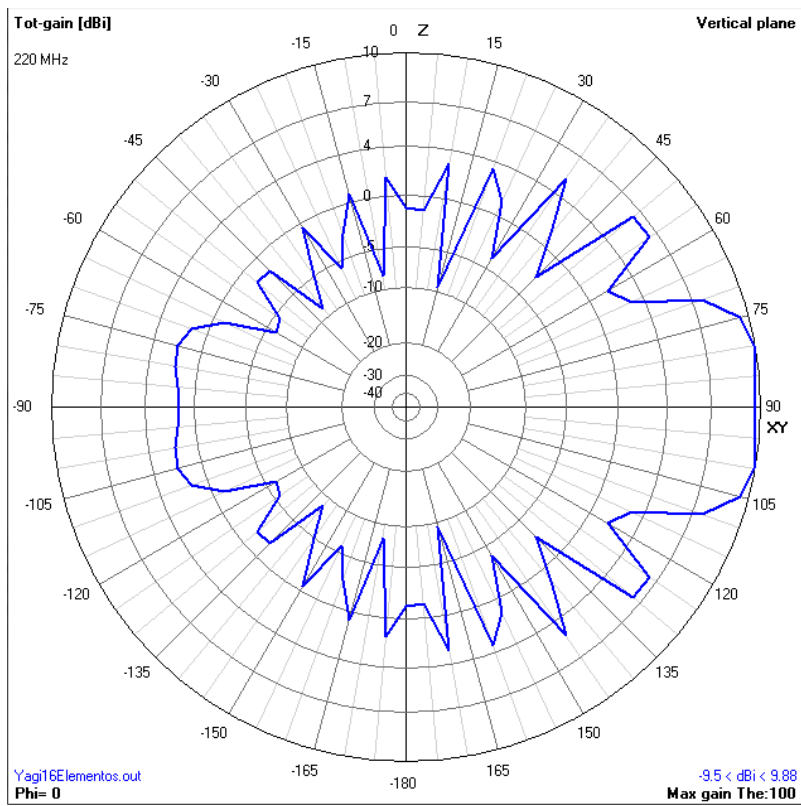


Figura 5.14: Diagrama de Radiação Vertical de uma Antena Yagi

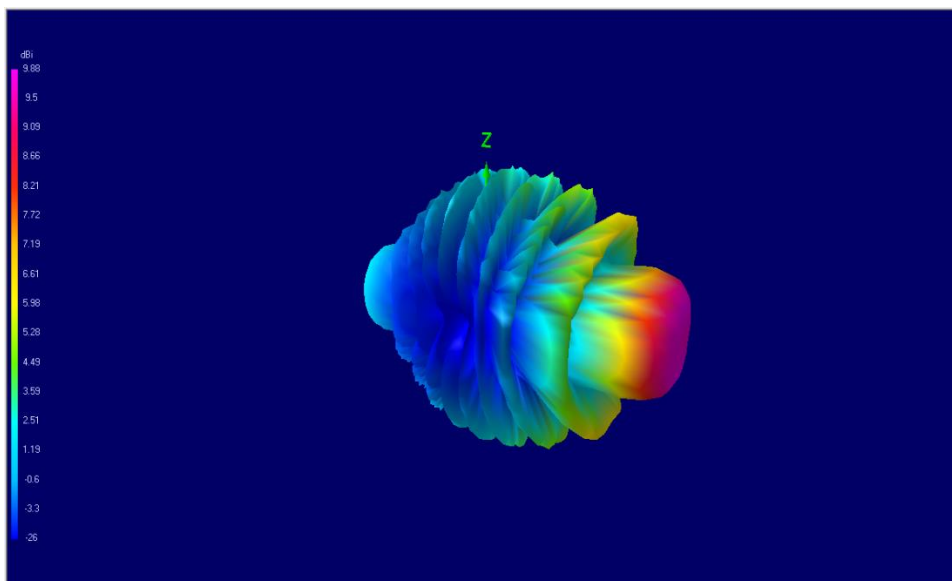


Figura 5.15: Diagrama de Radiação Tridimensional de uma Antena Yagi

## 6. Conclusão

Os resultados obtidos nesse trabalho são capazes de nortear professores e alunos para futuros trabalhos que envolvam qualquer contato com o Laboratório de Antenas do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília. Assuntos e resultados obtidos que são de suma importância para o avanço da tecnologia no país, e por isso, uma universidade renomada como é a Universidade de Brasília, deve poder dar aos alunos interessados nessas áreas, equipamentos e ambientes favoráveis para descobertas tecnológicas e experimentos práticos.

O último trabalho realizado por um aluno no Laboratório de Antenas tinha sido em 2012. Com esse trabalho, foi possível atualizar e conscientizar o estado dos atuais equipamentos que se encontram no laboratório, sendo possível observar quais equipamentos e consertos que devem ser realizados em semestres posteriores para que seja possível atender alunos, professores e pessoas interessadas em realizar experimentos e medições com antenas.

A maioria dos equipamentos que fazem parte do sistema de transmissão e recepção de sinais são antigos, de décadas passadas e estão obsoletos. Os manuais contendo informações sobre estes equipamentos se encontravam espalhados pelo laboratório, quando existente, assim como cabos e antenas.

Um dos propósitos desse trabalho foi visar a parte prática que o curso de Engenharia Elétrica pode fornecer aos alunos e trabalhar em conjunto com técnicos do laboratório para conhecer o funcionamento dos equipamentos, saindo um pouco da parte teórica do curso, responsável por mais de 90% das disciplinas envolvidas no fluxo. Pude, portanto, organizar os manuais presentes no laboratório e antenas, assim como cabos que foram utilizados em trabalhos em semestres anteriores que estavam jogados pelo telhado do SG11.

Do ponto de vista de pesquisa e ensino, como trabalho futuro pode ser proposto o desenvolvimento de roteiros de experimentos a serem realizados no laboratório de antenas envolvendo sinais e antenas que operem na faixa de frequência de até 6GHz, bem como a realização de estudos complementares dos modelos que apresentaram valor aproximado ao experimental, buscando relacionar o seu uso para faixa de frequências mais altas e realizando

uma maior quantidade de medidas objetivando a obtenção de uma maior amostra para permitir avaliação estatística do erro associado. [6]

Além disso, foi possível ter contato com *softwares* que simulam, a partir de parâmetros fundamentais das antenas, diversas características importantes, tais como: diagrama de radiação e uma possível otimização de antenas.

## 7. Referências Bibliográficas

- [1] SADIKU, MATTHEW N. O. *Elementos de Eletromagnetismo – 3ª edição, Bookman*
- [2] WILLIAM H. HAYT, JR. E BUCK. JOHN A, *Eletromagnetismo – Sexta Edição, Editora LTC*
- [3] ULABY, FAWWAZ T., *Eletromagnetismo para Engenheiros, Bookman*
- [4] STUTZMAN, W. E THIELE, G., *Antenna Theory and Design, 3rd edition John Wiley & Sons, 2014*
- [5] SOARES, ANTONIO J. M. E SILVA, FRANKLIN DA C., *Antenas e Propagação, 2003*
- [6] SILVA, MAURICIO A. E TERADA, M. *Atualização do Laboratório de Antenas do ENE/UNB para Medição de Sinais em Ambiente Wireless operando até 6GHz, 2011.*
- [7] F. C. C. DE CASTRO E P.R.G. FRANCO, *Parâmetros e Propriedades de uma Antena*
- [8] OLIVEIRA, C.L. E BRITO, M. F. M., *Medidas de Diagramas de Radiação de Antenas via Computador Digital, 1995*
- [9] <http://www.evilprofessores.co.uk/bolometer-theory/> acessado em 25/07/2015
- [10] J. D. KRAUS, *Antennas, Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1983.*
- [11] C. A. BALANIS, *Antenna Theory: Analysis and Design, Virginia: John Wiley & Sons, 2005.*



## **PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS DE SWR E DIAGRAMA DE RADIAÇÃO NO LABORATÓRIO DE ANTENAS**

### **1. MEDIDA DE SWR**

- 1.1 Verificar o seletor de tensão no transmissor e no medidor de SWR (220V) e ajustar se necessário
- 1.2 Conectar a antena ao terminal de saída da linha fendida.
- 1.3 Ligar os aparelhos.
- 1.4 Selecionar a frequência de interesse no transmissor (MOD ON).
- 1.5 Ajustar a penetração da sonda na linha fendida para a mínima penetração.
- 1.6 Ajustar o parafuso de calibragem da sonda para o valor máximo.
- 1.7 Procurar uma posição de máximo na linha e normalizar este ponto na posição de SWR igual a 1 no medidor de SWR.
- 1.8 A partir deste ponto, mover em direção ao gerador e fazer a leitura de SWR. O valor de SWR será lido diretamente do medidor quando o ponteiro atingir um valor máximo e começar a voltar.

### **2. MEDIDA DO DIAGRAMA DE RADIAÇÃO**

- 2.1 Verificar o seletor de tensão do bolômetro antes de ligar o aparelho. Para a conexão na bancada de medição do diagrama de radiação o seletor deve estar ajustado para 110V.
- 2.2 Com os aparelhos ligados e a antena posicionada corretamente, levantar a mesma para a posição de 0° de inclinação.
- 2.3 Com o transmissor ligado, encontrar o sinal de frequência de interesse e ajustar o mesmo no equipamento de medição.
- 2.4 Rodar a antena até encontrar um ponto onde o sinal é máximo. Ajustar este ponto como 0° no seletor de rotação.
- 2.5 A partir deste ponto, girar a antena de 0 a 180° no sentido horário e depois de 0 a 180° no sentido anti-horário, anotando os valores de leitura no bolômetro.
- 2.6 Marcar estes pontos no papel fornecido, obtendo assim o diagrama de radiação da antena.

Obs: quando o sinal da antena na leitura do bolômetro cair muito, mudar a escala do aparelho, fornecendo mais 10dB de ganho. Assim, adicionar estes 10dB na leitura da escala do aparelho, que varia de 0 a 10dB.